

[Previous Doc](#)   [Next Doc](#)   [Go to Doc#](#)  
[First Hit](#)

[Generate Collection](#)

L1: Entry 291 of 331

File: JPAB

Aug 12, 1997

PUB-N0: JP409207889A

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 09207889 A

TITLE: AUTOMATICALLY STEERING DEVICE FOR SHIP

PUBN-DATE: August 12, 1997

INVENTOR-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
HANE, FUYUKI	
UENO, TETSUO	

ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
TOKIMEC INC	

APPL-NO: JP08176522

APPL-DATE: July 5, 1996

INT-CL (IPC): B63 H 25/04; G05 D 1/00

ABSTRACT:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide the optimum needle change track plan by feeding back parameters which determine characteristics of a ship which are assumed by an identification computing part to a track computing part, a feed forward controller, and a feedback controller and replacing them by previous parameters in each unit.

SOLUTION: In a track computing part 12-1, a reference course of a needle is obtained by computing by use of a set course of needle, set value, and a bow azimuth, and a deviation from the bow azimuth which is an output to be controlled is obtained in a first adder 12-4. A feedback controller 12-3 inputs this deviation, computes a feedback steering angle, and outputs it to a second adder 12-5. A feed forward controller 12-2 inputs a reference course of needle, computes a feed forward steering angle, outputs it to the second adder 12-5, and adds input by the second adder 12-5 to obtain a command steering angle and output it to an adder 13. An identification computing unit 12-6 inputs the deviation of the first adder 12-4, computes parameters which determine characteristics of a ship when it changes its course, and outputs them to the track computing part 12-1 and each controller.

COPYRIGHT: (C) 1997, JPO

[Previous Doc](#)   [Next Doc](#)   [Go to Doc#](#)

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平9-207889

(43)公開日 平成9年(1997)8月12日

(51)Int.Cl.<sup>8</sup>  
B 6 3 H 25/04  
G 0 5 D 1/00

識別記号

府内整理番号

F I  
B 6 3 H 25/04  
G 0 5 D 1/00

技術表示箇所  
G  
A

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 26 頁)

(21)出願番号 特願平8-176522

(22)出願日 平成8年(1996)7月5日

(31)優先権主張番号 特願平7-307746

(32)優先日 平7(1995)11月27日

(33)優先権主張国 日本 (JP)

(71)出願人 000003388

株式会社トキメック

東京都大田区南蒲田2丁目16番46号

(72)発明者 羽根 冬希

東京都大田区南蒲田2丁目16番46号 株式会社トキメック内

(72)発明者 植野 哲夫

東京都大田区南蒲田2丁目16番46号 株式会社トキメック内

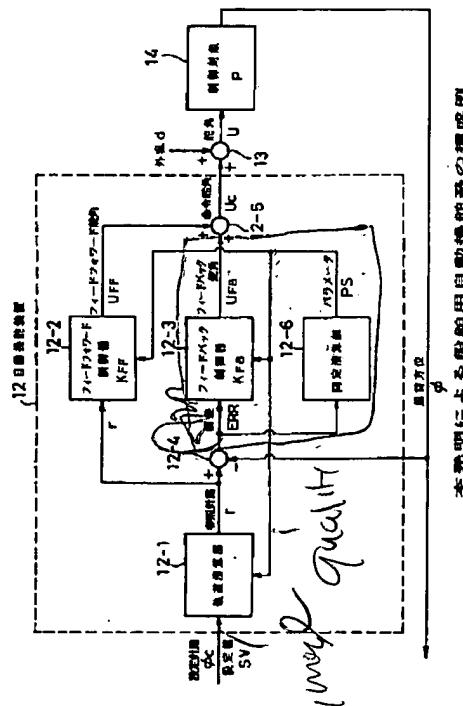
(74)代理人 弁理士 松隈 秀盛

(54)【発明の名称】 船舶用自動操舵装置

(57)【要約】

【課題】 自動変針時における制御対象である船舶と自動操舵装置のパラメータのずれによる性能低下を防止し、最適な変針軌道計画を可能にすること目的をとする。

【解決手段】 参照針路に対する船首方位の偏差に基づいて命令舵角を出力する自動操舵装置と該自動操舵装置に対して船首方位をフィードバックする制御ループとを有する船舶用自動操舵装置において、自動操舵装置は、軌道計画に基づいた最適参照針路を演算する軌道演算部と制御ループを安定化するために閉ループ制御を提供するフィードバック制御器と制御ループの変針特性を高めるために開ループ制御を提供するフィードフォワード制御器と実際の船舶のパラメータを推定演算する同定演算部とを有する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 参照針路に対する船首方位の偏差に基づいて命令舵角を出力する自動操舵装置と該自動操舵装置に対して船首方位をフィードバックする制御ループとを有する船舶用自動操舵装置において、

上記自動操舵装置は、軌道計画に基づいた参照針路を演算する軌道演算部と上記制御ループを安定化させるために閉ループ制御を提供するフィードバック制御器と上記制御ループの変針特性を高めるために開ループ制御を提供するフィードフォワード制御器と上記偏差に基づいて船舶の特性を定めるパラメータを演算する同定演算部とを有することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項2】 請求項1記載の船舶用自動操舵装置において、

上記軌道演算部によって求められる参照針路は加速モード、等速モード及び減速モードを含むように時間管理されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項3】 請求項2記載の船舶用自動操舵装置において、

上記加速モードにおいて、上記参照針路の初期値として、変針開始時点の船舶の船首方位の角速度及び角加速度の値を取り入れるように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項4】 請求項2又は3記載の船舶用自動操舵装置において、

上記加速モード及び減速モードにおいて、上記参照針路の時間に関する2階微分は時間に関する2次関数となるように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項5】 請求項2、3又は4記載の船舶用自動操舵装置において、

上記等速モードにおいて、上記参照針路の時間に関する2階微分はゼロとなるように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項6】 請求項1、2、3、4又は5記載の船舶用自動操舵装置において、

上記フィードバック制御器は上記参照針路に対する船首方位の偏差を入力してフィードバック舵角を出力し、上記フィードフォワード制御器は上記参照針路を入力してフィードフォワード舵角を出力し、上記自動操舵装置は上記フィードバック舵角とフィードフォワード舵角の和によって上記命令舵角を演算しそれを出力信号として出力するように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項7】 請求項6記載の船舶用自動操舵装置において、

上記自動操舵装置より出力された命令舵角と角度換算された外乱を入力して船舶の舵角を演算する加算器を有し、該加算器より出力された舵角を制御対象に入力するように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵

## 装置。

【請求項8】 請求項7記載の船舶用自動操舵装置において、

上記フィードフォワード制御器は上記船舶の舵角から上記船首方位までの伝達特性の逆特性を有することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項9】 請求項6、7又は8記載の船舶用自動操舵装置において、

上記参照針路は上記フィードフォワード舵角及びその角速度の各々の最大値を取り込むことを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項10】 請求項2、3、4、5、6、7、8又は9記載の船舶用自動操舵装置において、

上記同定演算部は自動変針時において上記加速モードの終了時点及び上記等速モードの終了時点及び上記軌道計画による変針後の静定状態の時点における上記偏差を保持するように構成されていることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項11】 請求項10記載の船舶用自動操舵装置において、

上記同定演算部は上記静定状態の時点にて保持された上記偏差を用いて上記加速モードと上記等速モードの各々の終了時点におけるバイアス外乱推定値を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項12】 請求項11記載の船舶用自動操舵装置において、

上記同定演算部は上記等速モードの終了時点の上記バイアス外乱推定値によって修正された上記等速モードの終了時点にて保持された上記偏差を用いて上記船舶の特性を定めるパラメータの1つである旋回力指数を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【請求項13】 請求項11又は12記載の船舶用自動操舵装置において、

上記同定演算部は上記加速モードの終了時点の上記バイアス外乱推定値によって修正された上記加速モードの終了時点にて保持された上記偏差と上記旋回力指数とを用いて上記船舶の特性を定めるパラメータの1つである追従安定性指数を演算することを特徴とする船舶用自動操舵装置。

40 【請求項14】 請求項2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12又は13記載の船舶用自動操舵装置において、

上記同定演算部によって推定された上記船舶の特性を定めるパラメータは上記軌道演算部、上記フィードフォワード制御器及び上記フィードバック制御器にフィードバックされ、その各々において以前のパラメータと置き換えられることを特徴とする船舶用自動操舵装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

50 【発明の属する技術分野】本発明は船舶用自動操舵装置

のオートパイロットに関し、より詳細には斯かるオートパイロットの変針時及び保針時における船舶のバラメータの見積もり値と実際値との差に起因した誤差を低減することによる性能向上に関する。

## 【0002】

【従来の技術】図10に従来の船舶用自動操舵装置の制御系のブロック図を示す。斯かる制御系を以下に単に自動操舵系と称する。自動操舵系は第1の加算器11と自動操舵装置即ちオートパイロット120と操舵機16と第2の加算器13と船体14-1と船首方位検出器14-2とを含む。

【0003】自動操舵系に入力信号 $\phi_{IN}$ として設定針路 $\phi_c = \phi_{IN}$ が入力される。加算器11は設定針路 $\phi_c$ と船首方位 $\phi$ の偏差 $E_{RR} = \phi_c - \phi$ を求める。自動操舵装置即ちオートパイロット120は斯かる偏差 $E_{RR}$ と設定針路 $\phi_c$ を入力して命令舵角 $U_c$ を出力する。斯かる命令舵角 $U_c$ は操舵機16に供給される。

【0004】操舵機16は舵角 $U$ を命令舵角 $U_c$ に迅速に追従させるためのサーボ機構を有し、1次遅れ要素に相当する。船体14-1には風、波浪等の外乱 $d$ が作用する。加算器13は操舵機16の出力信号である舵角 $U$ に角度換算した外乱 $d$ を加算する。

【0005】船体14-1は船舶の方位軸周りに回転する運動系であると見なすことができる。船舶の角速度(旋回角速度)は船首方位 $\phi$ の角速度(1階微分)として表される。船体14-1は加算器13の出力信号 $U + d$ を入力して船首方位の角速度 $d\phi/dt$ を発生する。

【0006】船首方位検出器14-2は船首方位の角速度 $d\phi/dt$ より船首方位 $\phi$ を演算する。船首方位検出器14-2はジャイロコンパス、磁気コンパス等を含むものであってよい。斯かる船首方位 $\phi$ は加算器11にフィードバックされる。こうして閉ループが構成され、この閉ループは、加算器11の出力である偏差 $E_{RR}$ がゼロになるように動作する。このとき船首方位 $\phi$ は自動操舵系の出力信号 $\phi_{OUT} = \phi$ として出力される。

【0007】自動操舵装置即ちオートパイロット120は、一般に変針モードと保針モードの2モードにて作動される。変針モードは、前の設定状態と異なる設定針路 $\phi_c$ が入力される変針時に対応し、保針モードは前の設定状態を保持し続ける保針時に対応する。

【0008】図11を参照して自動操舵装置即ちオートパイロット120の構成と動作を説明する。オートパイロット120はモード制御部120-1と線形要素120-2及び非線形要素120-3とを有し、偏差 $E_{RR}$ と設定針路 $\phi_c$ を入力する。

【0009】モード制御部120-1は偏差 $E_{RR}$ と設定針路 $\phi_c$ を入力して、自動操舵系が変針モードと保針モードのいずれのモードにて作動されるべきかを判定し、変針モード又は保針モードに対応した制御信号SGを出力する。

【0010】線形要素120-2は、比例+積分+微分(PID)動作の機能、及びフィルタの機能を有する。非線形要素120-3は天候調整機構を有する。

【0011】比例(P)動作及び微分(D)動作は、自動操舵中に船首方位の安定を保持するように機能し、通常の自動操舵系の周波数帯にて作動する。積分(I)動作は外乱 $d$ が船体14-1に作用したとき船体14-1に生じる船首方位 $\phi$ の偏差 $E_{RR}$ を定的にゼロにするように機能し、通常の運行で使用する低周波数域にて作動する。フィルタ機能は高周波域の外乱 $d$ を除去するよう作動する。

【0012】天候調整機構は、外乱 $d$ に起因して操舵機16に不要な操作量が生ずることを防止するように作動する。こうして、偏差信号 $E_{RR}$ は線形要素120-2と非線形要素120-3の各動作によって処理され、命令舵角 $U_c$ が生成され、斯かる命令舵角 $U_c$ はオートパイロット120の出力信号として出力される。

【0013】次に、保針状態から変針状態に推移し、再び保針状態に戻る場合について、オートパイロット120の動作を説明する。最初にモード制御部120-1は、供給された設定針路 $\phi_c$ より保針状態であると判定し、保針モードに対応した制御信号SGを線形要素120-2及び非線形要素120-3を出力する。

【0014】線形要素120-2に供給される制御信号SGは自動操舵系の保針性能を定める比例、微分、積分及びフィルタの各ゲイン及び定数を含み、非線形要素120-3に供給される制御信号SGは保針性能を提供するための天候調整機構の設定値を含む。こうして、自動操舵系は保針モードにて作動される。

【0015】次に設定針路 $\phi_c$ が変化すると、モード制御部120-1は変針状態であると判定する。例えば、偏差 $E_{RR}$ の絶対値が所定の基準値以上となったときに、変針状態であると判定する。同様に、モード制御部120-1は、変針状態であると判定すると、変針モードに対応した制御信号SGを線形要素120-2及び非線形要素120-3に出力する。

【0016】線形要素120-2に供給される制御信号SGは自動操舵系の変針性能を定める比例、微分、積分及びフィルタの各ゲイン及び定数を含み、非線形要素120-3に供給される制御信号SGは変針性能を提供するための命令信号を含む。こうして、自動操舵系は変針モードにて作動される。

【0017】設定針路 $\phi_c$ が一定に維持されると、モード制御部120-1は、再び保針状態であると判定し、自動操舵系は保針モードにて作動される。

【0018】次に、保針モード及び変針モードにおける線形要素120-2及び非線形要素120-3の各動作を説明する。保針モードでは、上述のように自動操舵系の閉ループを安定化するように制御信号SGが設定される。変針モードでは、開始直後から短時間で船首方位 $\phi$

を新たな設定針路 $\phi_c$ に追従させることが優先される。従って、線形要素120-2の積分動作は停止され、比例動作、微分動作及びフィルタ動作の各ゲインと時定数が設定され、更に、非線形要素120-3の動作は停止される。

【0019】変針モードから保針モードへ変化した場合、線形要素120-2の積分動作は、保持していた値を0にリセットしてから作動を開始する。線形要素120-2の他の動作及び非線形要素120-3の動作は、保針モードにおけるゲイン、時定数及び設定値を使用して作動を開始する。

#### 【0020】

【発明が解決しようとする課題】オートパイロット120は対象船を考慮して設計されるが、実際の船舶の特性が対象船の特性と異なったり、積み荷等による影響で特性が変化することがあり、実際の船舶では設計性能を発揮することができない場合がある。

【0021】図12に従来のオートパイロット120における変針応答特性を示す。説明を簡単化するために、オートパイロット120より非線形要素120-3を除去し、線形要素120-2のみの応答を表す。縦軸は変針量、横軸は時間である。保針時の設定針路 $\phi_c$ をゼロとし、変針開始時点 $t=0$ にて、オートパイロット120にステップ状の設定針路 $\phi_c$ が入力され、それより命令舵角 $U_c$ が outputされる。命令舵角 $U_c$ は操舵機16に供給され、それによって船体14-1の船首方位 $\phi$ は変化する。

【0022】直線125は設定針路 $\phi_c$ を表し、実線の曲線126は設計上の応答特性を示し、実線以外の曲線127、128、129は実際の応答特性を示す。曲線126と曲線127、128、129を比較すると明らかなように、実際の応答特性は設計上の応答特性とはかなり異なることとなる。

【0023】このような場合、操船者は上記のPIDゲインとフィルタ定数を現実の船舶特性に適するように調整している。この調整作業は、保針時でも可能だが変針時に比べて船首方位の変化量が少ないため主として変針時に行う。これは時間と手数がかかり、且つ熟練を要する。

【0024】従来の自動操舵系では、ステップ入力の設定針路 $\phi_c$ に船首方位 $\phi$ を追従させることだけが考慮されていた。従って操舵機16への命令舵角に対する許容可能な角度及び角速度を無視している。その結果、例えば設計の際に現状の船舶の特性が既知であっても、運用の際に操舵機の性能の制限を受け、結局、図12に示した如き、設計応答特性と実際の応答特性との間に差が生ずる。

【0025】本発明は斯かる点に鑑み、現状の船舶の特性を同定する機能を有する自動操舵装置を提供することを目的とする。

【0026】本発明は斯かる点に鑑み、変針モードにおいて、操舵機の性能を考慮することができる変針軌道計画ができる自動操舵装置を提供することを目的とする。

#### 【0027】

【課題を解決するための手段】本発明によると、例えば図1に示すように、参照針路に対する船首方位の偏差に基づいて命令舵角を出力する自動操舵装置と該自動操舵装置に対して船首方位をフィードバックする制御ループとを有する船舶用自動操舵装置において、上記自動操舵装置は、軌道計画に基づいた参照針路を演算する軌道演算部と上記制御ループを安定化するために閉ループ制御を提供するフィードバック制御器と上記制御ループの変針特性を高めるために開ループ制御を提供するフィードフォワード制御器と上記偏差に基づいて船舶の特性を定めるパラメータを演算する同定演算部と有することを特徴とする。

【0028】本発明によると、フィードバック制御器12-3によって閉ループ系が提供され、斯かる閉ループ系によって自動操舵系の制御ループの安定化が確保される。この閉ループ系は参照針路に対する船首方位の偏差がゼロとなるように作動する。

【0029】本発明によると、フィードフォワード制御器12-2によって開ループ系が提供され、開ループ系によって自動操舵系の制御ループの変針特性が高められる。この開ループ系は船首方位が直ちに参照針路に一致するように作動する。

【0030】本発明によると、軌道演算部12-1において、時間管理された参照針路が演算される。斯かる参照針路は時間を変数とし且つ次の条件を満たす。

30 【0031】(1) 加速モード、等速モード、減速モードの各モード毎に時間管理された関数である。

(2) 加速モードにおいて、参照針路の初期値として船舶の船首方位の角速度及び角加速度が取り込まれる。

(3) 加速モードと減速モードにおいて、時間に関する2階微分は時間に関する2次関数となる。

【0032】(4) 参照針路はモード切り換え時において、時間に関して滑らかである、即ち連続的且つ2階微分可能である。

(5) 参照針路は、等速モードにおいて、時間に関する2階微分がゼロとなる。

【0033】本発明によると、船舶用自動操舵装置において、上記フィードバック制御器は上記参照針路に対する船首方位の偏差を入力してフィードバック舵角を出力し、上記フィードフォワード制御器は上記参照針路を入力してフィードフォワード舵角を出力し、上記自動操舵装置は上記フィードバック舵角とフィードフォワード舵角の和によって上記命令舵角を演算しそれを出力信号として出力するように構成されていることを特徴とする。

【0034】本発明によると、船舶用自動操舵装置において、上記自動操舵装置より出力された命令舵角と角度

換算した外乱を入力して舵角を演算する加算器を有し、該加算器より出力された舵角を制御対象に入力するよう構成されていることを特徴とする。

【0035】本発明によると、船舶用自動操舵装置において、上記フィードフォワード制御器の伝達特性は、上記制御対象に入力される舵角から上記船首方位までの伝達特性と逆特性を有することを特徴とする。フィードフォワード舵角の最大値はフィードフォワード舵角の1階微分がゼロとなる時点で生じ、フィードフォワード舵角の角速度の最大値は加速モードの始点時点又は終了時点で生ずる。

【0036】本発明によると、船舶用自動操舵装置において、上記参照針路は、上記フィードフォワード舵角及びその角速度の各々の最大値を取り込むことを特徴とする。

【0037】本発明によると、船舶用自動操舵装置において、上記同定演算部は自動変針時において上記加速モードの終了時点及び上記等速モードの終了時点及び上記軌道計画による変針後の静定状態の時点における上記偏差を保持するように構成されている。また、上記同定演算部は上記静定状態の時点にて保持された上記偏差を用いて上記加速モードと上記等速モードの各々の終了時点におけるバイアス外乱推定値を演算することを特徴とする。上記同定演算部は上記等速モードの終了時点の上記バイアス外乱推定値によって修正された上記等速モードの終了時点にて保持された上記偏差を用いて上記船舶の特性を定めるパラメータの1つである旋回力指数を演算することを特徴とする。更に、上記同定演算部は上記加速モードの終了時点の上記バイアス外乱推定値によって修正された上記加速モードの終了時点にて保持された上記偏差と上記旋回力指数とを用いて上記船舶の特性を定めるパラメータの1つである追従安定性指数を演算することを特徴とする。

【0038】本発明によると、上記同定演算部によって推定された上記船舶の特性を定めるパラメータは上記軌道演算部、上記フィードフォワード制御器及び上記フィードバック制御器にフィードバックされ、その各々において以前のパラメータと置き換えられることを特徴とする。

【0039】尚、本発明に関して、以下の文献が参考になろう。詳細は斯かる文献を参照されたい。

(1) “二次安定化トラッキング制御とその高速位置決め装置への応用” 山本他、計測自動制御学会論文集、v o. 1. 29, No. 1, 55/62 (1993年)

【0040】

【発明の実施の形態】以下に図1～図9を参照して本発明の実施例について説明する。図1は本発明による船舶用自動操舵装置の制御系即ち自動操舵系のブロック図を示す。斯かる自動操舵系は自動操舵装置即ちオートパイロット12と加算器13と制御対象14とを含む。制御

対象14は図10に示した船体14-1と船首方位検出器14-2を一体化したものである。尚、操舵機16を省略したのは、制御対象14にその性能を含ませたからである。

【0041】オートパイロット12に入力信号として設定針路 $\phi_c$ 及び設定値SVと船首方位 $\phi$ とが入力され、出力信号として命令舵角 $U_c$ が出力される。尚、設定値SVについては後に説明する。

【0042】オートパイロット12より出力された命令舵角 $U_c$ は加算器13に供給される。加算器13は命令舵角 $U_c$ と角度換算の外乱dとを加算し、その結果 $U = U_c + d$ を制御対象14に出力する。制御対象14の出力は船首方位 $\phi$ として出力され、且つオートパイロット12にフィードバックされる。

【0043】次に本例の自動操舵装置即ちオートパイロット12の構成及び動作を説明する。本例のオートパイロット12は、軌道演算部12-1とフィードフォワード制御器12-2とフィードバック制御器12-3と第1及び第2の加算器12-4、12-5と同定演算部12-6とを有する。

【0044】軌道演算部12-1は設定針路 $\phi_c$ と設定値SV及び船首方位 $\phi$ を用いて最適な変針特性を有する参照針路 $r$ を演算し、それを出力する。第1の加算器12-4は軌道演算部12-1から出力された参照針路 $r$ と制御対象14の出力である船首方位 $\phi$ を入力して、船首方位の偏差ERRを求める。斯かる偏差ERRは次の式によって表され、フィードバック制御器12-3に供給される。

【0045】

【数1】  $ERR = r - \phi$

【0046】フィードバック制御器12-3は斯かる偏差ERRを入力してフィードバック舵角 $U_{FB}$ を演算し、それを第2の加算器12-5に供給する。フィードフォワード制御器12-2は参照針路 $r$ を入力してフィードフォワード舵角 $U_{FF}$ を演算し、それを第2の加算器12-5に供給する。第2の加算器12-5はフィードバック舵角 $U_{FB}$ とフィードフォワード舵角 $U_{FF}$ とを加算して命令舵角 $U_c$ を求める。斯かる命令舵角 $U_c$ はオートパイロット12の出力信号として加算器13に供給される。

【0047】フィードバック制御器12-3は、自動操舵系において閉ループ系を構成し、この閉ループ系は参照針路 $r$ に対する船首方位 $\phi$ の偏差ERRをゼロにするように作動する。従って、フィードバック制御器12-3は自動操舵系の制御ループの安定性を確保するように機能する。

【0048】一方、フィードフォワード制御器12-2は、自動操舵系において開ループ系を構成し、この開ループ系は船首方位 $\phi$ を直ちに参照針路 $r$ に一致させるように作動する。従って、フィードフォワード制御器12

-2は自動操舵系の制御ループの変針特性の向上に寄与するように機能する。

【0049】即ち、フィードフォワード制御器12-2は、変針時の操船要求と船体特性を満足する参照針路 $r$ を使用して、最適な変針軌道を有する船首方位 $\phi$ を実現するように作用する。もし、船舶の積荷状態等の影響によって、フィードフォワード制御器12-2の作動だけでは船首方位 $\phi$ が参照針路 $r$ に一致しない場合でも、フィードバック制御器12-3の作動によって最終的には船首方位 $\phi$ は参照針路 $r$ に一致する。

【0050】同定演算部12-6は加算器12-4より出力された偏差 $E_{RR}$ を入力して変針時における船舶の特性を定めるパラメータ $P_S$ を演算し、それを軌道演算部12-1、フィードフォワード制御器12-2及びフィードバック制御器12-3に供給する。

【0051】偏差 $E_{RR}$ が生ずるのは、オートパイロット12が対応する実際の船舶の特性のパラメータが設計上のパラメータと異なることに起因すると考えてよい。同定演算部12-6は偏差 $E_{RR}$ がゼロとなるように実際のパラメータ $P_S$ を演算する。尚、このパラメータ $P_S$ の内容については後に説明する。

【0052】次に、本例のオートパイロット12を含む自動操舵系の制御ループにおけるフィードフォワード制御器12-2及びフィードバック制御器12-3の機能をより詳細に説明する。

【0053】参照針路 $r$ 及び外乱 $d$ から船首方位 $\phi$ までの伝達関数は次の式のように表される。次の式の第1項は変針又は応答特性を表し、第2項は外乱特性を表す。

【0054】

【数2】

$$\phi(s) = G_r(s) r(s) + G_d(s) d(s)$$

【0055】ここで、 $s$ はラプラス演算子である。 $G_r(s)$ は参照針路 $r$ から船首方位 $\phi$ までの伝達関数であり、 $G_d(s)$ は外乱 $d$ から船首方位 $\phi$ までの伝達関数であり、それぞれ次のように表される。

【0056】

$$【数3】 G_r(s) = [P(s) K_{FF}(s) + P(s) K_{FB}(s)] / [1 + P(s) K_{FB}(s)]$$

【0057】

【数4】

$$G_d(s) = P(s) / [1 + P(s) K_{FB}(s)]$$

【0058】 $K_{FF}(s)$ 、 $K_{FB}(s)$ はそれぞれフィードフォワード制御器12-2及びフィードバック制御器12-3の伝達関数である。 $P(s)$ は制御対象14の\*

$$G_r(s) = [1 + P(s) K_{FB}(s)] / [1 + P(s) K_{FB}(s)] \\ = 1$$

【0069】この場合、フィードバック制御器12-3に起因する閉ループ系の遅れはフィードフォワード制御器12-2の補償効果によって打ち消され、参照針路 $r$ が直接的に船首方位 $\phi$ となる。従って、参照針路 $r$ が与※50

\*伝達関数であり、次のように表される。

【0059】

$$【数5】 P(s) = K_s / [(T_s s + 1) s]$$

【0060】ここで、 $K_s$ 、 $T_s$ は船体14-1の操縦性指数又はパラメータであり、それぞれ旋回力指数及び追従安定性指数と称される。分母の因数 $s$ は船首方位検出器14-2の積分特性による。

【0061】追従安定性指数 $T_s$ 及び旋回力指数 $K_s$ の極性は互いに同一であり、安定船では正、不安定船では負である。尚、追従安定性指数 $T_s$ 及び旋回力指数 $K_s$ は予め与えられているものとする。

【0062】上述のように、数2の式の右辺の第1項は変針特性又は応答性を表し、第2項は外乱特性を表す。第1項及び第2項にフィードバック制御器12-3の伝達関数 $K_{FB}(s)$ が含まれている。従って、フィードバック制御器12-3は変針特性と外乱特性の両者に作用する。これは、フィードバック制御器12-3によって、自動操舵系における閉ループ系が構成されることによる。

【0063】従って、フィードバック制御器12-3は、変針特性と外乱特性の両者を考慮して設計される。フィードバック制御器12-3の設計は、例えば、従来のオートパイロットの設計とほぼ同様な方法によってなされてよい。

【0064】一方、フィードフォワード制御器12-2の伝達関数 $K_{FF}(s)$ は数2の式の第2項のみに含まれている。従って、フィードフォワード制御器12-2は変針特性のみに作用する。また、この伝達関数 $K_{FF}(s)$ は数3の式の分子に含まれているから、自動操舵系の閉ループ系の安定性に寄与しない。即ち、フィードフォワード制御器12-2は開ループ制御のみを行うものである。

【0065】次に図2及び図3を参照して本例によるフィードフォワード制御器12-2及びフィードバック制御器12-3の構成例を説明する。本例では、フィードフォワード制御器12-2の伝達関数 $K_{FF}(s)$ を次のように設定する。

【0066】

$$【数6】 K_{FF}(s) \equiv P(s)^{-1}$$

【0067】ここで、添字(-1)は逆数を表す。数6の式を数3の式に代入すると次のようになる。

【0068】

【数7】

※えられるとほぼ同時に船首方位 $\phi$ は参照針路 $r$ に等しく $(\phi = r)$ なる。

【0070】更に、参照針路 $r$ とフィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の関係を数6の式より求めると次のようになる。

## 【0071】

## 【数8】

$$U_{FF}(s) = P(s)^{-1} r(s) \\ = (T_s s^2 + s) r(s) / K_s$$

【0072】図2はフィードフォワード制御器12-2の構成例を示すブロック図である。sはラプラス演算子である。フィードフォワード制御器12-2は、例えば、2つの微分動作部12-2A、12-2Bと比例ゲイン $T_s$ を有する比例動作部12-2Cと加算器12-2Dと比例ゲイン $1/K_s$ を有する比例動作部12-Eとを有するように構成してよい。数8の式を時間領域によって表すと次のようになる。

## 【0073】

## 【数9】

$$U_{FF}(t) = [T_s \cdot r''(t) + r'(t)] / K_s$$

【0074】ここで、tは時間を表し、 $r'(t)$ 、 $r''(t)$ は、それぞれ参照針路 $r$ の時間に関する1階微分、2階微分を表す。この式より明らかのように、フィードフォワード制御器12-2は少なくとも2階微分可能な参照針路 $r(t)$ を入力して、数9の式の演算を行い、得られたフィードフォワード舵角 $U_{FF}(t)$ を出力する。

【0075】次に図3を参照してフィードバック制御器12-3の構成例を説明する。本例によると、フィードバック制御器12-3の伝達関数 $K_{FB}(s)$ を、例えば次のように設定する。

## 【0076】

$$【数10】K_{FB}(s) = K_p + T_D s / (T_F s + 1) \\ + 1 / (T_I s)$$

【0077】ここに、 $K_p$ は比例ゲイン、 $T_D$ は微分時定数、 $T_F$ はフィルタ時定数、 $T_I$ は積分時定数である。

【0078】フィードバック制御器12-3は図示のように、比例ゲイン $K_p$ を有する比例動作部12-3A、微分時定数 $T_D$ を有する微分動作部12-3B、積分時定数 $T_I$ を有する積分動作部12-3C、フィルタ時定数 $T_F$ を有する2段のローパスフィルタ12-3D及び加算器12-3Eを有するように構成してよい。

【0079】但し、変針時では、応答性を良くするために、積分動作部12-3Cは保針時の値を保持した状態にて維持され、比例動作部12-3A、微分動作部12-3B及びフィルタ12-3Dのみが作動する。変針後には、積分動作部12-3Cは偏差 $E_R$ が静定した状態より作動開始される。

【0080】次に、図4～図6を参照して軌道演算部12-1について説明する。図4は軌道演算部12-1の構成例を示す。図示のように、本例の軌道演算部12-1は、軌道計画部12-1Aと針路演算部12-1Bと含み、上述のように設定針路 $\phi_c$ 及び設定値 $S_V$ 及び船首方位 $\phi$ （既にオートパイロット12に入力されている

ため図示していない。）を入力して参照針路 $r$ を出力する。

【0081】設定値 $S_V$ は、次のような値を含む。

(1) 変針時の船首方位の角速度（旋回角速度）の設定値： $\omega_s$

(2) フィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の最大値の設定値： $U_R$

(3) フィードフォワード舵角の最大値の角速度 $U_{FF}'$ の設定値： $\omega_R$

10 【0082】旋回角速度の設定値 $\omega_s$ は一定値として設定されるが、それができない場合もある。その場合には、軌道計画部12-1Aによって新たな旋回角速度の設定値 $\omega_s$ が設定される。

【0083】フィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の設定値 $U_R$ 及びフィードフォワード舵角の角速度 $U_{FF}'$ の設定値 $\omega_R$ は、操舵機16の性能を考慮して、フィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の最大値及びフィードフォワード舵角の角速度 $U_{FF}'$ の最大値を使用してそれぞれ設定される。

20 【0084】こうして、変針時において、旋回角速度の設定値 $\omega_s$ によって操船要求が満たされ且つ設定値 $U_R$ 、 $\omega_R$ によって操舵機16の追従可能領域にて使用することができる最適な参照針路 $r$ の実現が可能になる。

【0085】船首方位 $\phi$ は変針開始時の旋回角速度と旋回角加速度の各値を作るために用いる。即ち、次のように表される。

## 【0086】

$$【数11】\phi'(t_c) = d\phi/dt | t = t_c \\ \phi''(t_c) = d^2\phi/dt^2 | t = t_c$$

30 【0087】ここで、 $t_c$ は変針開始時点である。これらの値は、例えば変針中に新たに別の変針を実施する場合、外乱によって船が動搖している場合の変針等で無駄舵の少ない効果的な舵操作を実現させる。旋回角加速度値 $\phi''(t_c)$ 及び旋回角速度値 $\phi'(t_c)$ は、軌道演算部12-1の初期値として取り込まれる。

40 【0088】軌道計画部12-1Aは、設定針路 $\phi_c$ と設定値 $S_V$ 、旋回角加速度値 $\phi''(t_c)$ 及び旋回角速度値 $\phi'(t_c)$ を用いて、加速、等速及び減速の3モードにより構成された参照針路 $r$ を演算するように構成されている。軌道計画部12-1Aは更に、フィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の最大値及びその角速度 $dU_{FF}/dt$ の最大値が、それぞれフィードフォワード舵角の設定値 $U_R$ 及びその角速度の設定値 $\omega_R$ 以下となるように制限する。

【0089】針路演算部12-1Bは、軌道計画部12-1Aによって演算された又は設定された定数、即ち、各モード時間 $T_a$ 、 $T_v$ 、 $T_d$ 、加速及び減速定数 $\beta_a$ 、 $\beta_d$ 、旋回角速度の設定値 $\omega_s$ 、初期値 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$ 、 $C_{3v}$ 、 $C_{2d}$ 、 $C_{3d}$ を用いて、時々刻々の参照針路 $r$ を演算し出力する。これらの定数については以下に説明

する。

【0090】先ず参照針路  $r$  と設定針路  $\phi_c$  の関係を説明する。参照針路  $r$  の変化量即ち変針量  $\Delta r$  は次のように設定針路  $\phi_c$  の変化量として表される。

【0091】

【数12】  $\Delta r = \phi_c - \phi_{c0}$

【0092】ここで、添字0は前回の値を表す。尚、説明を簡単化するために、以下に、前回の設定針路  $\phi_{c0}$  を0、変針開始時点  $t$  を  $t=0$  とするが、それによって、任意時点を開始時点とする場合に対する説明の一般化が損なわれることはない。

【0093】軌道計画部12-1Aの動作について詳細に説明する。先ず基本となる参照針路  $r$ 、フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  及びその角速度  $dU_{FF}/dt = U_{FF}'$  について説明する。

【0094】本例によると、参照針路  $r$  は、次のような条件を有するように構成される。

(1) 加速モード、等速モード及び減速モードの3モードより構成され、各モード毎に時間管理される。参照針路  $r(t)$  は、各モード毎に時間  $t$  を変数とする関数となる。

(2) 加速モードと減速モードでは、参照針路  $r(t)$  \*

$$\begin{aligned} r_a''(t) &= \alpha_a / T_a^2 t^2 + \beta_a / T_a t + C_{1a} \\ r_a'(t) &= \alpha_a / (3 T_a^2) t^3 + \beta_a / (2 T_a) t^2 + C_{1a} t \\ r_a(t) &= \alpha_a / (12 T_a^2) t^4 + \beta_a / (6 T_a) t^3 \\ &+ C_{1a} / 2 t^2 + C_{2a} t \end{aligned}$$

【0099】ここで、 $r_a$  は加速モードにおける参照針路、 $r_a'$  はその時間に関する1階微分、 $r_a''$  はその時間に関する2階微分である。 $t$  は時間、 $T_a$  は加速時間、 $\beta_a$  は加速定数である。 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$  はそれぞれ加速モードにおける参照針路の角加速度  $r''$  の初期値及び参照針路の角速度  $r'$  の初期値である。定数  $\alpha_a$  を求めるために加速モードの終了時点 ( $t=T_a$ ) において参照針路  $r_a(t)$  の2階微分値  $r_a''(t)$  がゼロとなることを利用する。

【0100】

【数14】  $r_a''(T_a) = \alpha_a + \beta_a + C_{1a} = 0$

【0101】これより、定数  $\alpha_a$  が求められる。

【0102】

【数15】  $\alpha_a = -\beta_a - C_{1a}$

【0103】 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$  は上述のように、それぞれ参照針路の角加速度  $r''$  及び角速度  $r'$  の初期値であるが、ここでは船舶の旋回角加速度  $\phi''$  及び旋回角速度  $\phi'$  の初期値を用いる。従って次のように表される。

【0104】

【数16】  $C_{1a} = \phi''(0)$

$C_{2a} = \phi'(0)$

$$\begin{aligned} r_a''(T_a) &= r_a''(T_a) = 0 \\ r_a'(T_a) &= r_a'(T_a) = (T_a / 6) (\beta_a + 4 C_{1a}) + C_{2a} \end{aligned}$$

\*の時間  $t$  に関する2階微分は2次関数となる。

【0095】(3) 等速モードでは参照針路  $r(t)$  の時間  $t$  に関する1階微分は一定であり、2階微分はゼロである。

(4) 加速モードでは、参照針路  $r(t)$  は変針開始時の船舶の旋回角加速度  $d^2 \phi / dt^2 = \phi''$  及び旋回角速度  $d\phi / dt = \phi'$  の値を初期値として取り込む。

【0096】このような条件を満たす参照針路  $r(t)$  の例について説明する。船首方位  $\phi$  の初期値  $\phi_0$  は直接的には用いられない。何故なら、オートパイロット12への変針命令量は現在の船首方位  $\phi$  に対する変化量  $\Delta \phi$  として与えられるからである。

【0097】(1) 加速モード:  $[0 \leq t \leq T_a]$   
通常、変針開始時において、船舶は旋回角加速度  $\phi''$  及び旋回角速度  $\phi'$  の値を有する。従って加速モードではそれらの値を初期値として取り込む。加速モードの目的は、モード終了時 ( $t = T_a$ ) に参照針路の角速度  $r'$  を旋回角速度の設定値  $\omega_s$  に一致させ、船舶の初期運動量を減衰させることである。加速モードにおける参照針路  $r_a(t)$  は次のように表される。

【0098】

【数13】

$$\begin{aligned} r_a''(t) &= \alpha_a / T_a^2 t^2 + \beta_a / T_a t + C_{1a} \\ r_a'(t) &= \alpha_a / (3 T_a^2) t^3 + \beta_a / (2 T_a) t^2 + C_{1a} t \\ r_a(t) &= \alpha_a / (12 T_a^2) t^4 + \beta_a / (6 T_a) t^3 \\ &+ C_{1a} / 2 t^2 + C_{2a} t \end{aligned}$$

※【0105】ここで、 $\phi$  は船首方位、 $\phi'$  及び  $\phi''$  はその時間に関する1階微分及び2階微分である。

【0106】

(2) 等速モード:  $[T_a \leq t \leq (T_a + T_v)]$   
等速モードでは参照針路の角速度  $r'$  は一定であり及び角加速度  $r''$  はゼロである。従って参照針路  $r_v(t)$  は次のように表される。

【0107】

【数17】  $r_v''(t) = 0$

$r_v'(t) = \omega_s$

$r_v(t) = \omega_s (t - T_a) + C_{3v}$

【0108】ここで、 $r_v$  は等速モードにおける参照針路、 $r_v'$  はその時間に関する1階微分、 $r_v''$  はその時間に関する2階微分である。 $T_v$  は等速時間、 $\omega_s$  は旋回角速度の設定値、 $C_{3v}$  は等速モードにおける参照針路  $r$  の初期値である。等速モードの開始時点と加速モードの終了時点の各々において、参照針路、その微分値及びその2階微分値は互いに等しい。従って次の式が成り立つ。

【0109】

【数18】

15

$$r_v (T_a) = r_a (T_a) = (T_a^2 / 12) (\beta_a + 5C_{1a}) + C_{2a} T_a = C_{3v}$$

【0110】(3) 減速モード:  $(T_a + T_v) \leq t$  \* る。 $\leq (T_a + T_v + T_d)$ 減速モードでは、モードの終了時点にて参照針路の角速度度  $r'$  及び角加速度  $r''$  がゼロとなるように減衰され \*

$$\begin{aligned} r_d''(t) &= \beta_d / T_d^2 (t - T_a - T_v)^2 \\ &- \beta_d / T_d (t - T_a - T_v) \\ r_d'(t) &= \beta_d / (3T_d^2) (t - T_a - T_v)^3 \\ &- \beta_d / (2T_d) (t - T_a - T_v)^2 + C_{2d} \\ r_d(t) &= \beta_d / (12T_d^2) (t - T_a - T_v)^4 \\ &- \beta_d / (6T_d) (t - T_a - T_v)^3 + C_{2d} (t - T_a - T_v) + C_{3d} \end{aligned}$$

【0112】ここで、 $r_d$  は減速モードにおける参照針路、 $r_d'$  はその時間に関する1階微分、 $r_d''$  はその時間に関する2階微分である。 $T_d$  は減速時間、 $\beta_d$  は減速定数である。 $C_{2d}$ 、 $C_{3d}$  はそれぞれ減速モードにおける参照針路の角速度  $r'$  の初期値及び参照針路  $r$  の初

※期値である。減速モードの開始時点と等速モードの終了時点の各々において、参照針路、その微分値及びその2階微分値は互いに等しい。従って次の式が成り立つ。

$$\begin{aligned} r_d''(T_a + T_v) &= r_v''(T_a + T_v) = r_d''(T_a + T_v + T_d) = 0 \\ r_d'(T_a + T_v) &= r_v'(T_a + T_v) = \omega_s = C_{2d} \\ r_d'(T_a + T_v + T_d) &= -\beta_d T_d / 6 + \omega_s = 0 \\ r_d(T_a + T_v) &= r_v(T_a + T_v) = \omega_s T_v + C_{3d} \end{aligned}$$

【0114】次にフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  及びその角速度  $dU_{FF}/dt$  について説明する。軌道計画において操舵機の舵角は命令舵角  $U_c$  ではなく、フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  を指す。参照針路  $r$  が制御対象 14 の逆モデルであるフィードフォワード制御器 12-2 に入力されると、その出力がフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  である。以下に随時フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  を単に操舵機の舵角と称し、その角速度  $dU_{FF}/dt = U_{FF}'$  を単に舵角角速度と称することとする。【0115】舵角  $U_{FF}$  及び舵角角速度  $dU_{FF}/dt$  の最大及び最小値は装備された操舵機の性能に関係する。操舵機への実際の入力はフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  とフィードバック舵角  $U_{FB}$  の和である命令舵角  $U_c$  である。フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  は確定値であるが、フィードバック舵角  $U_{FB}$  は船舶と設定値のパラメータの間のずれ、非線形項、外乱等の影響に起因して生じるため不確定値である。従ってこれらを考慮したフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  の最大値を既定することによって操舵機の舵角の作動可能な範囲内で軌道計画が実現できる。【0116】操舵機の舵角角速度は、フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  の微分値  $U_{FF}'$  で対応させる。この値  $U_{FF}'$  を操舵機の追従角速度性能の領域内の所定の値として取り込むことによって、操舵機の遅れの影響を小さくすることができる。【0117】フィードフォワード舵角  $U_{FF}$  及びその角速度  $dU_{FF}/dt = U_{FF}'$  は次の式によって表される。尚、数 9 の式も参照されたい。

16

【0111】

【数 19】

【0113】

【数 20】

★【0118】

【数 21】

$$\begin{aligned} U_{FF}(t) &= (T_s / K_s) (r'' + r' / T_s) \\ U_{FF}'(t) &= (T_s / K_s) (a_1 t^2 + a_2 t + a_3) \end{aligned}$$

【0119】 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$  は係数であり、次の式によつて表されるように、加速モード及び減速モード毎にそれぞれ異なる値として求められる。尚、加速モード及び減速モードに対してそれぞれ添字 a、d を付す。

【0120】

【数 22】 $a_{1a} = \alpha_a / (T_s T_a^2)$ 

$$a_{2a} = (1/T_a) (2\alpha_a / T_a + \beta_a / T_s)$$

$$a_{3a} = \beta_a / T_a + C_{1a} / T_s$$

$$a_{1d} = \beta_d / (T_s T_d^2)$$

$$a_{2d} = (1/T_d) (2\beta_d / T_d - \beta_d / T_s)$$

$$a_{3d} = -\beta_d / T_d$$

【0121】次に舵角  $U_{FF}$  が最大となる時点を求める。数 21 の式より明らかのように、舵角  $U_{FF}$  は、参照針路の角速度  $r'$  及び角加速度  $r''$  を含み、加速モード及び減速モードの各々にて極値を有する。舵角  $U_{FF}$  が極値となる時点は、舵角角速度  $U_{FF}'$  をゼロとおくことによって得られる。数 21 の式にて  $U_{FF}' = 0$  とおくと時間  $t$  に関する 2 次方程式が得られる。これを解いて次の式が得られる。

【0122】

$$【数 23】 t = -a_2 / (2a_1) + \text{flgs} \sqrt{((a_2 / 2a_1)^2 - a_3 / a_1)}$$

【0123】 $a_1, a_2, a_3$  は数22の式によって表される係数である。flgsは極性定数であり、安定船の場合は+1、不安定船の場合は-1である。参考として数23の式の右辺の2つの項の大小関係を次式に示す。数23の式の右辺の第1項を $t_1$ 、第2項を $t_2$ とする。

【0124】(1) 加速モード:

【0125】

【数24】 $t_1 = -T_s - T_a \beta_a / (2\alpha_a)$   
 $t_2 = |T_s|$

【0126】(2) 減速モード:

【0127】

【数25】 $t_1 = -T_s - T_d / 2$   
 $t_2 = |T_s|$

【0128】従って、舵角 $U_{FF}$ が極値となる時点 $t (> 0)$ は、安定船では $T_s > 0$ だから $t = t_1 + t_2$ 、不安定船では $T_s < 0$ だから $t = t_1 - t_2$ である。

【0129】極性定数flgs (=±1) は、舵角 $U_{FF}$ が極値となる時点 $t$ が、安定船及び不安定船の各々の場合に、加速モードの時間 $[0 \leq t \leq T_a]$ 及び減速モードの時間 $[(T_a + T_v) \leq t \leq (T_a + T_v + T_d)]$ 内の値となるように選択される。舵角 $U_{FF}$ の最大値は、数23の式によって表される時間 $t$ を数21の式の $U_{FF}$ に代入することによって得られる。

【0130】次に舵角角速度 $U_{FF}'$ が最大となる時点及び舵角角速度 $U_{FF}'$ の最大値を求める。数21の式に示されるように、舵角角速度 $U_{FF}'$ は時間 $t$ の2次関数であり、その1階微分は時間 $t$ の1次関数である。従って、舵角角速度 $U_{FF}'$ の最大値及び最小値は加速モード及び減速モードの開始時点又は終了時点に起る。

【0131】舵角角速度 $U_{FF}'$ は、加速モードでは船舶\*30 【表1】  
 設定値の条件

設定値	記号及び符号	達成水準	備考
変針量	± $r_{SIG}$	必須	
旋回角速度	± $\omega_s$	可能な限り	変針量と同符号
最大舵角	$U_R > 0$	必須	
舵角角速度	$\omega_R > 0$	必須	

【0136】図5に軌道計画部12-1Aの動作の手順を示す。ステップ101にて軌道計画部12-1Aの動作が開始される。ステップ102にて設定針路 $\phi_c$ と設定値 $S_V$ 及び加速モードの初期値 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$ が入力される。上述のように、設定値 $S_V$ は、変針時における船首方位の角速度(旋回角速度)の設定値 $\omega_s$ とフィードフォワード舵角の設定値 $U_R$ 及びその角速度設定値 $\omega_R$ を含む。数16の式に示すように、初期値 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$ はそれぞれ船舶の角加速度及び角速度の初期値 $\phi''(0)$ 、 $\phi'(0)$ である。

【0137】ステップ103にて加速モードの設定が行※50

\*の運動の初期値の影響を受けるが、減速モードではその影響は受けない。従って加速モードでは舵角角速度 $U_{FF}'$ の絶対値はモードの開始時点と終了時点では異なるが、減速モードでは舵角角速度 $U_{FF}'$ の絶対値はモードの開始時点と終了時点では同一である。以上より次の式が成り立つ。

【0132】

【数26】 $U_{FF}'_a(0) = (T_s / K_s) (\beta_a / T_a + C_{1a} / T_s)$

10  $U_{FF}'_a(T_a) = - (T_s / K_s) (\beta_a / T_a + 2 C_{1a} / T_a)$

$U_{FF}'_d(0) = - U_{FF}'_d(T_a) = (T_s \beta_d) / (K_s T_d)$

【0133】加速モードにおいて、 $U_{FF}'_a(0)$ と $U_{FF}'_a(T_a)$ の絶対値の大きさは、 $C_{1a}$ の極性によって変化する。 $U_{FF}'_a(0)$ と $U_{FF}'_a(T_a)$ の絶対値の大きい方に対して舵角角速度の設定値 $\omega_R$ を置き換えることによって、軌道計画に舵角角速度 $U_{FF}'$ の制限を導入することができる。

20 【0134】軌道計画部12-1Aは上述の内容を用いる。表1に、変針量 $r_{SIG}$ 、旋回角速度の設定値 $\omega_s$ 、最大舵角の設定値 $U_R$ 、及び最大舵角角速度の設定値 $\omega_R$ の達成水準を示す。これら設定値の全てを満足する参考針路 $r_a$ 、 $r_v$ 、 $r_d$ を一意的に求めることはできないので、設定値の達成水準は必須のものと必須でないもの、即ち、可変設定値がある。従って表1に示すように、必須設定値を満足させながら、可変設定値を調節して参考針路を演算する。

【0135】

【表1】  
 設定値の条件

40※われる。加速モードの設定について説明する。加速時間 $T_a$ と加速定数 $\beta_a$ は、数26の式によって表される舵角角速度 $U_{FF}'$ の最大値を用いて得られる。舵角角速度 $U_{FF}'$ の最大値は加速モードの開始時点( $t = 0$ )又は終了時点( $t = T_a$ )にて生ずる。

【0138】

【数27】 $t = 0 : \beta_a = C_{Ra} T_a$

$C_{Ra} = flg_a C_R - C_{1a} / T_s$

$t = T_a : \beta_a = C_{Ra} T_a - 2 C_{1a}$

$C_{Ra} = flg_a C_R$

【0139】ここで、 $flg_a$ は極性定数、 $C_R$ 、 $C_{Ra}$ は

それぞれ軌道定数及び加速モードの軌道定数である。軌道定数  $C_R$  は次のように表される。

## 【0140】

【数28】  $C_R = \omega_R (K_s / T_s)$ 

【0141】 旋回角速度の設定値  $\omega_s$  は加速モードの終了時点 ( $t = T_a$ ) における参照針路の角速度  $r'$  に一致する。従って数27式を数18の式の第2式に代入すると加速時間  $T_a$  に関する2次方程式が得られる。

## 【0142】

【数29】

$$t = 0 : C_{Ra} T_a^2 + 4 C_{1a} T_a + 6 (C_{2a} - \omega_s) = 0$$

$$t = T_a : C_{Ra} T_a^2 + 2 C_{1a} T_a + 6 (C_{2a} - \omega_s) = 0$$

【0143】 この2つの式より  $T_a$  を解くと次のようになる。

## 【0144】

【数30】  $t = 0 :$ 

$$T_a = -2 C_{1a} / C_{Ra} + \sqrt{((2 C_{1a} / C_{Ra})^2 - 6 (C_{2a} - \omega_s) / C_{Ra})}$$

 $t = T_a :$ 

$$T_a = -C_{1a} / C_{Ra} + \sqrt{((C_{1a} / C_{Ra})^2 - 6 (C_{2a} - \omega_s) / C_{Ra})}$$

【0145】 次に加速定数  $\beta_a$  を求める。先ず  $\omega_s$  と  $C_{2a}$  が等しいとき、数18の式の第2式に  $\omega_s = C_{2a}$  を代入して加速定数  $\beta_a$  が得られる。

## 【0146】

【数31】  $\beta_a = -4 C_{1a}$ 

【0147】 次に  $\omega_s$  と  $C_{2a}$  が等しくないとき、旋回角速度の設定値  $\omega_s$  及び初期値  $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$  より、加速モードの軌道定数  $C_{Ra}$  を求め、加速時間  $T_a$  及び加速定数  $\beta_a$  を計算する。表2に加速モードの軌道定数  $C_{Ra}$  の計算条件、即ち、旋回角速度の設定値  $\omega_s$  と加速モードの初期値  $C_{2a}$  との間の大小関係及び初期値  $C_{1a}$  とゼロとの間の大小関係によって、舵角角速度  $U_{FF}'$  の最大値の時点  $t$  及び極性定数  $flg_a$  がどのような値となるかを示す。

## 【0148】

【表2】 加速モードの軌道定数の条件

		t	flg_a
$\omega_s = C_{2a}$	$C_{1a} = 0$	—	—
	$C_{1a} > 0$	0	-1
	$C_{1a} < 0$	0	1
$\omega_s > C_{2a}$	$C_{1a} = 0$	$T_a$	1
	$C_{1a} > 0$	$T_a$	1
	$C_{1a} < 0$	0	1
$\omega_s < C_{2a}$	$C_{1a} = 0$	0	-1
	$C_{1a} > 0$	0	-1
	$C_{1a} < 0$	$T_a$	-1

【0149】 ステップ104にて減速モードが設定され

る。減速時間  $T_d$ 、減速定数  $\beta_d$  は舵角角速度  $U_{FF}'$  の最大値と旋回角速度設定値  $\omega_s$  は減速モードの終了時点でゼロとなることを用いて求められる。従って数26の式の第3式と数20の式の第3式によって次の式が得られる。

## 【0150】

【数32】  $\beta_d / T_d = C_{Rd} = flg_d C_R$ 

$$T_d = \sqrt{(6 / \omega_s) / C_R}$$

【0151】 ここで、 $flg_d$  は極性定数であり、符号判別関数  $sign$  を使用して次のように表される。

## 【0152】

【数33】  $flg_d = -sign(rsig)$ 

【0153】  $rsig$  は3つのモードにおける変針量  $\Delta r$  の総和を表す。ステップ105にて加速、等速及び減速モードにおける参照針路  $r$  の変化量、即ち変針量  $\Delta r$  を求める。加速モードにおける参照針路  $r$  の変化量を  $\Delta r_a$ 、等速モードにおける参照針路  $r$  の変化量を  $\Delta r_v$ 、減速モードにおける参照針路  $r$  の変化量を  $\Delta r_d$  とする。これらは次のように表される。

## 20 【0154】

$$【数34】 \Delta r_a = r_a (T_a) - r_a (0) = (T_a^2 / 12) (\beta_a + 5 C_{1a}) + C_{2a} T_a$$

$$\Delta r_v = r_v (T_a + T_v) - r_v (T_a) = \omega_s T_v$$

$$\Delta r_d = r_d (T_a + T_v + T_d) - r_d (T_a + T_v)$$

$$= -\beta_d T_d^2 / 12 + \omega_s T_d = \beta_d T_d^2 / 12$$

$$rsig = \Delta r_a + \Delta r_v + \Delta r_d$$

【0155】 但し、加速モードと減速モードでの変化量  $\Delta r_a$ 、 $\Delta r_d$  は等速モードでの変化量  $\Delta r_v$  より優先されるから、等速モードの時間、即ち、等速時間  $T_v$  は次式より求められる。

## 【0156】

【数35】  $T_v = \Delta r_v / \omega_s$ 

【0157】 ここで、 $\Delta r_v = rsig - \Delta r_a - \Delta r_d$  である。ステップ106にて等速モードが存在するか否かが判定される。等速モードが存在する場合には次の式が成り立つ。

## 【0158】

【数36】  $rsig > 0$  のとき、 $\Delta r_v \geq 0$ 40  $rsig < 0$  のとき、 $\Delta r_v \leq 0$ 

【0159】 数36の式が成り立つ場合にはステップ107に進み、数36の式が成り立たない場合にはステップ103に戻り、可変調節値である旋回角速度設定値  $\omega_s$  が再度設定される。

【0160】 ステップ107ではフィードフォワード舵角の最大値(絶対値)  $\max U_{FF}$  が演算される。フィードフォワード舵角の最大値  $\max U_{FF}$  は加速モード又は減速モードのいずれかにおいて生ずる。従って2つのモードにて最大値を求めて両者を比較し、より大きい方が最大値  $\max U_{FF}$  である。

21

【0161】フィードフォワード舵角 $U_{FF}$ の最大値  $\max U_{FF}$  が生ずる時点  $t_R$  は数23の式の  $t$  によって表される。従って  $t_R$  を数21の式に代入することによってフ\*

$$\max |U_{FFa}| \geq \max |U_{FFd}| \text{ のとき, } \max U_{FF} = \max |U_{FFa}|$$

$$\max |U_{FFa}| < \max |U_{FFd}| \text{ のとき, } \max U_{FF} = \max |U_{FFd}|$$

【0163】ステップ108にてフィードフォワード舵角の最大値  $\max U_{FF}$  が最大フィードフォワード舵角の設定値  $U_R$  と比較される。

【0164】

【数38】 $\max U_{FF} \leq U_R$ 

【0165】数38の式が成り立つ場合にはステップ109に進み、数38の式が成り立たない場合にはステップ103に戻る。こうして、本例によると、フィードフォワード舵角の最大値  $\max U_{FF}$  は、常にフィードフォワード舵角の設定値  $U_R$  より小さい値になるように制限される。

【0166】ステップ109では参照針路  $r$  を演算するために必要な定数、即ち、各モード時間  $T_a$ 、 $T_v$ 、 $T_d$ 、設定値  $\omega_s$ 、加速及び減速定数  $\beta_a$ 、 $\beta_d$ 、初期値  $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$ 、 $C_{3v}$ 、 $C_{2d}$ 、 $C_{3d}$  を求める。ステップ110にて軌道計画部12-1Aの動作が終了し、これらの値は針路演算部12-1Bに出力される。

【0167】最後に針路演算部12-1Bの動作を説明する。針路演算部12-1Bは軌道計画部12-1Aより供給されたモード時間  $T_a$ 、 $T_v$ 、 $T_d$ 、設定値  $\omega_s$ 、加速及び減速定数  $\beta_a$ 、 $\beta_d$ 、初期値  $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$ 、 $C_{3v}$ 、 $C_{2d}$ 、 $C_{3d}$  を使用して各モード毎の参照針路  $r(t)$  を演算し、それを出力する。

【0168】加速モード、等速モード及び減速モードにおける参照針路  $r(t)$  は、数13の式の第3式、数17の式の第3式及び数19の式の第3式によってそれぞれ求められる。また参照針路  $r(t)$  が求められると、数21の式を使用して、各モードにおけるフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  が求められる。

【0169】図6に参照針路  $r$  (図6B) とフィードフォワード舵角  $U_{FF}$  (図6A) の時間応答の例を示す。ここでは変針量  $\Delta r$  を+、加速モードの初期値  $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$  をゼロとした。

【0170】図7を参照して同定演算部12-6の構成及び動作を説明する。同定演算部12-6は加算器12-4の出力信号である偏差  $ERR$  を入力して船舶の特性を定めるパラメータ  $PS$  を推定演算する。パラメータ  $PS$  は、ここでは数5の式に含まれる旋回力指数  $K_s$  及び追従安定性指数  $T_s$  である。旋回力指数  $K_s$  及び追従安定性指数  $T_s$  は、設計値又は設定値として予め与えられているが、実際の船舶の値とは必ずしも一致しない。

【0171】同定演算部12-6は実際の船舶のパラメータ、即ち、追従安定性指数  $T_s$  及び旋回力指数  $K_s$  を推定演算するために設けられている。以下に、推定演算された実際値には添字  $a$  を付し設計値又は設定値には添字  $s$

22

\* フィードフォワード舵角の最大値  $\max U_{FF}$  が求められる。

【0162】

【数37】

$$\max |U_{FFa}| \text{ のとき, } \max U_{FF} = \max |U_{FFa}|$$

$$\max |U_{FFa}| < \max |U_{FFd}| \text{ のとき, } \max U_{FF} = \max |U_{FFd}|$$

※字  $e$  を付す。

【0172】本例の同定演算部12-6はフィルタ演算部12-6Aと3つのサンプルホールド器12-6B、12-6C、12-6Dと追従安定性指数演算部12-6Eと旋回力指数演算部12-6Fとバイアス外乱演算部12-6Gとを有する。

【0173】フィルタ演算部12-6Aは偏差  $ERR$  に含まれるノイズ成分を除去し平滑化した偏差  $err$  を出力する。フィルタ演算部12-6Aの特性は次のように表される。

【0174】

【数39】

$$err(s) = ERR(s) / (T_{F1}s + 1)^2$$

【0175】ここで、 $T_{F1}$  はフィルタ時定数、 $s$  はラプラス演算子である。尚、以下の記述において、フィルタ演算部12-6Aの動作は同定演算部12-6の基本動作ではないので、省略する。即ち、 $err(t) = ERR(t)$  として扱う。

【0176】サンプルホールド器12-6B、12-6C、12-6Dは、偏差  $err$  の値をそれぞれサンプリング時点  $T_a$ 、 $T_a + T_v$ 、 $T_{steady}$  で保持する。従って、サンプルホールド器12-6B、12-6C、12-6Dはサンプリング時点  $T_a$ 、 $T_a + T_v$ 、 $T_{steady}$  における偏差  $err$  の値をそれぞれ出力する。尚、サンプリング時点  $T_{steady}$  は後述する。

【0177】追従安定性指数演算部12-6Eはサンプリング時点  $T_a$  における偏差  $err$  の値と旋回力指数推定値  $K_{sa}$  とバイアス外乱推定値  $e_D(T_a)$  を入力して追従安定性指数推定値  $T_{sa}$  を演算する。旋回力指数演算部12-6Fはサンプリング時点  $T_a + T_v$  における偏差  $err$  の値とバイアス外乱推定値  $e_D(T_a + T_v)$  を入力して旋回力指数推定値  $K_{sa}$  を演算する。

【0178】バイアス外乱演算部12-6Gはサンプリング時点  $T_{steady}$  における偏差  $err$  の値を入力して、サンプリング時点  $T_a$ 、 $T_a + T_v$  におけるバイアス外乱推定値  $e_D(T_a)$ 、 $e_D(T_a + T_v)$  を演算し、それぞれ追従安定性指数演算部12-6E及び旋回力指数演算部12-6Fに出力する。

【0179】推定された旋回力指数  $K_{sa}$ 、追従安定性指数  $T_{sa}$ 、即ち、推定パラメータ  $PS$  は、軌道演算部12-1、フィードフォワード制御器12-2及びフィードバック制御器12-3にフィードバックされ、各々において推定パラメータ  $PS$  を以前のパラメータと置き換える。但し、フィードバック制御器12-3では推定パラメータ  $PS$  を用いて適当なゲイン又は定数を置き換える。

る。

【0180】図8を参照して同定演算部12-6の動作シーケンスを説明する。同定演算部12-6は変針モードにて動作する。変針期間におけるサンプリング時点は、加速モード終了時点  $t = T_a$  及び等速モード終了時点  $t = T_a + T_v$  であり、この時点の偏差  $e_{rr}$  の値がサンプリングされて保持される。次の静定時間では、偏差  $e_{rr}$  が静定した時点  $t = T_{\text{steady}}$  にてサンプリングされ保持され、その後、バイアス外乱推定値  $e_d (T_a)$ 、 $e_d (T_a + T_v)$ 、旋回力指数推定値  $K_{sa}$  及び追従安定性指数推定値  $T_{sa}$  が演算される。

【0181】旋回力指数推定値  $K_{sa}$  及び追従安定性指数推定値  $T_{sa}$  の演算は次のことを前提とする。

(I) 変針時において、パラメータの実際値と設定値の間に差があると参照針路  $r$  と船首方位  $\phi$  との間の偏差  $E_{RR}$  に誤差が生ずる。対象とする船体モデルを線形1次式として扱う場合、参照針路  $r$  は既知であるから、偏差  $E_{RR}$  の時間関数は解析的に解くことができる。

(II) 等速モードが存在する。加速モードにて偏差  $E_{RR}$  が生じ、斯かる偏差  $E_{RR}$  は等速モードにて収斂して一定値となる。

(III) 静定時間において、偏差  $E_{RR}$  に生じる誤差は外乱に含まれるバイアス成分に起因する。

【0182】従って、旋回力指数推定値  $K_{sa}$  及び追従安定性指数推定値  $T_{sa}$  の演算は次のように3つのステップにてなされる。

【0183】(ステップ1) バイアス外乱の推定: 変針時の外乱影響を除くために、変針後の定常状態の偏差量よりバイアス外乱推定値  $e_d$  を演算する。

【0184】(ステップ2) 旋回力指数の推定: バイアス外乱推定値  $e_d (T_a + T_v)$  によって修正された等速モードの偏差  $e_K$  が旋回力指数  $K_s$  の実際値  $K_{sa}$  と設定値  $K_{se}$  の差に起因するものである場合には、フィードバック制御器12-3の比例ゲイン  $K_p$  とフィードフォワード制御器12-2で用いる旋回力指数  $K_s$  の設定値  $K_{se}$  及び角速度設定値  $\omega_s$  の関係より旋回力指数  $K_s$  の実際値  $K_{sa}$  を演算する。

【0185】(ステップ3) 追従安定性指数の推定: バイアス外乱推定値  $e_d (T_a)$  によって修正された加速モードの終了時点における偏差  $e_T$  とステップ2で求めた旋回力指数の実際値(推定値)  $K_{sa}$  を用いる。参照針路  $r$  に対する偏差  $e_{rr}$  の伝達特性の応答式において、応答解の偏差を得られた偏差値に一致させるように実際値  $T_{sa}$  を演算し、それを推定値とする。

【0186】同定演算部12-6の動作を詳細に説明す\*

$$e_d (t) \Big|_{t=\infty} = \lim_{s \rightarrow 0} s G_d (s) d_0 / s$$

$$= -d_0 / (K_p K_{sa})$$

【0197】ここで、 $d_0$  は変針前後の外乱変化量である約50であり、外乱は船首方位に従属する性質をもつとする。  $G_d$

\*る。変針時のオートパイロットを構成する閉ループ系において、参照針路  $r$  と外乱  $D$  を入力、偏差  $E_{RR}$  を出力とする伝達特性は次のようになる。

【0187】

【数40】

$$E_{RR} (s) = E_{RRNU} (s) / E_{RRDE} (s)$$

$$E_{RRNU} (s) = [(T_{sa} - K_0 T_{sa}) s^2 + (1 - K_0) s] r (s) - (T_{sa} s + 1) D (s)$$

$$E_{RRDE} (s) = s (T_{sa} s + 1) + K_{FB} (s) K_{sa}$$

10 【0188】ここで、 $K_0 = K_{sa} / K_{se}$  であり、 $K_{FB}$  は変針用フィードバック制御器である。但し、外乱  $D$  は船体14-1と船首方位検出器14-2の間に入力するものとする。次に参照針路  $r$  から偏差  $E_{RR}$  までの伝達関数を求める。数40の式より明らかのように、偏差  $E_{RR}$  は、参照針路  $r$  の2階微分及び1階微分を含む。言い換えれば、参照針路の角加速度  $r''$  と角速度  $r'$  が入力として作用する。

【0189】変針用フィードバック制御器  $K_{FB}$  は近似的に  $K_{FB} = K_p + T_d s$  と表される。このとき、数40の20式の分母  $E_{RRDE} (s)$  はラプラス演算子  $s$  の2次式に帰着する。

【0190】

$$【数41】 E_{RRNU} (s) = [(T_{sa} - K_0 T_{sa}) s^2 + (1 - K_0) s] r (s)$$

$$E_{RRDE} (s) = s (T_{sa} s + 1) + K_{FB} (s) K_{sa} = T_{sa} s^2 + (1 + K_{sa} T_d) s + K_{sa} K_p$$

【0191】更に、2次標準系を当てはめると伝達関数  $G_c (s)$  は次のようにになる。

【0192】

30 【数42】  $E_{RR} (s) = G_c (s) r (s)$

$$G_c (s) = (C_2 s^2 + C_1 s) / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)$$

【0193】ここで、固有周波数  $\omega_n$ 、減衰定数  $\zeta$ 、 $s$  及び  $s^2$  の係数  $C_1$ 、 $C_2$  は次のように表される。

【0194】

$$【数43】 \omega_n = \sqrt{(K_{sa} K_p / T_{sa})}$$

$$\zeta = (1 + K_{sa} T_d) / (2\omega_n T_{sa})$$

$$C_2 = 1 - K_0 (T_{se} / T_{sa})$$

$$C_1 = (1 - K_0) / T_{sa}$$

40 【0195】バイアス外乱演算部12-6Gの動作を詳細に説明する。数40の式において、バイアス外乱に起因する変針後の定常偏差は次のようになる。

【0196】

【数44】

25

26

は外乱  $D(s)$  から偏差  $ERR(s)$  までの伝達関数で \* 【0198】  
あり、次のように表される。

$$G_0(s) = \frac{-T_{sa}s - 1}{(T_{sa}s + 1)s + K_{ra}(s)K_{sa}}$$

【0199】等速モードの終了時点における外乱による \* 【0200】  
偏差は次のように表される。 \* 【数46】

$$e_D(T_a + T_v) = G_0(s) \text{d}_0 / s^2 \mid t=T_a + T_v$$

$$\approx e_D(\infty) (\Delta r_a + \Delta r_v) / rsig$$

【0201】加速モードの終了時点における外乱による 10★詳細に説明する。等速モードの状態にて十分長い時間が  
偏差は次のように表される。 経過したものとする。参考針路の角速度  $r'$  が一定のとき偏差  $err$  の最終値は次のようになる。

【0202】

【数47】  $e_D(T_a) \approx e_D(\infty) \Delta r_a / rsig$  【0204】

【0203】 次に旋回力指数演算部12-6Fの動作を★ 【数48】

$$e_k = err(T_a + T_v) + e_D(T_a + T_v)$$

$$= \lim_{s \rightarrow 0} s G_c(s) \omega_s / s^2$$

$$= (\omega_s / K_p) (1 / K_s - 1 / K_{se})$$

【0205】ここで、 $err(T_a + T_v)$  は実際の偏差値である。従って求める旋回力指数  $K_s$  の実際値(推定値)  $K_{sa}$  は次のようになる。

【0206】

【数49】

$$K_{sa} = \frac{1}{e_k K_p / \omega_s + 1 / K_{se}}$$

【0207】 次に追従安定性指数演算部12-6Eの動作を詳細に説明する。参考針路  $r$  は軌道演算部12-1より時間の関数として得られ、その角加速度  $r''$  及び角速度  $r'$  をラプラス演算子  $s$  によって表すと次のようになる。

【0208】

$$【数50】 s^2 r(s) = 2! \alpha_a / T_a^2 s^3 + \beta_a / T_a s^2 + C_{1a} / s$$

$$s r(s) = 3! \alpha_a / (3 T_a^2) s^4 + 2! \beta_a / (2 T_a) s^3 + C_{1a} / s^2 + C_{2a} / s$$

【0209】 この式を数42の式に代入すると変針時の解析解が得られる。この解の時間条件は  $0 \leq t \leq T_a$  である。

【0210】

$$【数51】 ERR(s) = [1 / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)] \times [2C_1 \alpha_a / T_a^2 / s^4 + (2C_2 \alpha_a / T_a^2 + C_1 \beta_a / T_a) / s^3 + (C_2 \beta_a / T_a + C_1 C_{1a}) / s^2 + (C_2 C_{1a} + C_1 C_{2a}) / s]$$

【0211】 この解はそれぞれ  $1/s^4$ 、 $1/s^3$ 、 $1/s^2$ 、 $1/s$  の項に対する各解の和となっている。1/ $s^4$ 、1/ $s^3$ 、1/ $s^2$ 、1/ $s$  の項の係数を1として、偏差  $ERR$  の解析解を求める。1/ $s^4$ 、1/ $s$  ☆50

☆<sup>3</sup>、1/ $s^2$ 、1/ $s$  の項に対する各解をそれぞれ  $ERR_4$ 、 $ERR_3$ 、 $ERR_2$ 、 $ERR_1$  とすると次のように表される。尚、解は減衰定数  $\zeta$  が1より大きいか、等しいか又は小さいかによって異なる。

【0212】 (1)  $\zeta < 1$  の場合：

【0213】

$$【数52】 err_1(t) = -\exp(-at) [(a / \omega) \sin \omega t + \cos \omega t] + 1$$

$$err_2(t) = \exp(-at) [(a C_{11} - 1) \omega^{-1} \sin \omega t + C_{11} \cos \omega t] + t - C_{11}$$

$$err_3(t) = \exp(-at) [(C_{11} - a C_{12}) \omega^{-1} \sin \omega t - C_{11} \cos \omega t] + t^2 / 2 - C_{11} t + C_{12}$$

$$err_4(t) = -\exp(-at) [(C_{12} + a C_{13}) \omega^{-1} \sin \omega t + C_{13} \cos \omega t] + t^3 / 6 - C_{11} t^2 / 2 + C_{12} t + C_{13}$$

【0214】 ここで、 $a$ 、 $\omega$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{12}$ 、 $C_{13}$ は次の式によって表される。

【0215】

$$【数53】 a = \zeta \omega_n$$

$$\omega = \omega_n \sqrt{(1 - \zeta^2)}$$

$$C_{11} = 2a / \omega_n^2$$

$$C_{12} = C_{11}^2 - 1 / \omega_n^2$$

$$C_{13} = C_{11} (2 / \omega_n^2 - C_{11}^2)$$

【0216】 (2)  $\zeta = 1$  の場合：

【0217】

$$【数54】 err_1(t) = -\exp(-\omega_n t) [\omega_n t + 1] + 1$$

$$err_2(t) = \exp(-\omega_n t) [t + 2 / \omega_n] + t - 2 / \omega_n$$

27

$$\begin{aligned} \text{err}_3(t) &= -\exp(-\omega_n t) [t+3/\omega_n] (1/\omega_n) + t^2/2 - [2t-3/\omega_n] (1/\omega_n) \\ \text{err}_4(t) &= \exp(-\omega_n t) [t+4/\omega_n] (1/\omega_n^2) + t^3/6 - t^2/\omega_n + [3t-4/\omega_n] (1/\omega_n^2) \end{aligned}$$
【0218】(3)  $\zeta > 1$  の場合:

【0219】

$$\begin{aligned} \text{【数55】} \text{err}_1(t) &= (q_1 - q_2)^{-1} [q_2 \exp(-q_1 t) - q_1 \exp(-q_2 t)] + 1 \\ \text{err}_2(t) &= (q_1 - q_2)^{-1} [-(q_2/q_1) \exp(-q_1 t) + (q_1/q_2) \exp(-q_2 t)] + t + (q_1 + q_2)/\omega_n^2 \\ \text{err}_3(t) &= (q_1 - q_2)^{-1} [(q_2/q_1^2) \exp(-q_1 t) - (q_1/q_2^2) \exp(-q_2 t)] + t^2/2 + [(q_1 + q_2)/\omega_n^2] [-t + (q_1 + q_2)/\omega_n^2] - 1/\omega_n^2 \\ \text{err}_4(t) &= (q_1 - q_2)^{-1} [-(q_2/q_1^3) \exp(-q_1 t) + (q_1/q_2^3) \exp(-q_2 t)] + t^3/6 + [(q_1 + q_2)/\omega_n^2] (t^2/2) + [(q_1 + q_2)^2/\omega_n^4 - 1/\omega_n^2] [t - (q_1 + q_2)/\omega_n^2] + (q_1 + q_2)/\omega_n^4 \end{aligned}$$

\* 【0220】ここで、 $q_1$ 、 $q_2$  は次の式によって表される。

【0221】

 $q_1 = \omega_n [-\zeta + \sqrt{(\zeta^2 - 1)}]$  $q_2 = \omega_n [-\zeta - \sqrt{(\zeta^2 - 1)}]$ 【0222】従って数51の式の解析解  $\text{err}_{rs}(t)$  は次のようにになる。

【0223】

$$\begin{aligned} \text{【数57】} \text{err}_{rs}(t) &= [(2C_1 \alpha_a/T_a^2) \text{err}_4(t) + (2C_2 \alpha_a/T_a^2 + C_1 \beta_a/T_a) \text{err}_3(t) + (C_2 \beta_a/T_a + C_1 C_{1a}) \text{err}_2(t) + (C_2 C_{1a} + C_1 C_{2a}) \text{err}_1(t)]/\omega_n^2 \end{aligned}$$

\* 【0224】追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  の演算の際、パラメータの極性が関係する。演算された旋回力指數  $K_s$  の推定値  $K_{sa}$  の極性により実際の船舶が安定船か又は不安定船かが定まる。従って、実際の追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  の演算において、表3に示すような  $2\omega_n \zeta$  及び  $C_1$  の設定を行う。但し、演算上の都合により、不安定船の追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  は負であるが正として求める。

【0225】

\* 【表3】

## 設計による設定値と実際の船舶の実際値

設定値	実際値	$2\omega_n \zeta$	$C_1$
安定船	安定船	$(1 + K_{sa} T_a) / T_{sa}$	$(1 - K_a) / T_{sa}$
安定船	不安定船	$(-1 + K_{sa} T_a) / T_{sa}$	$(-1 - K_a) / T_{sa}$
不安定船	不安定船	$(-1 + K_{sa} T_a) / T_{sa}$	$(-1 + K_a) / T_{sa}$
不安定船	安定船	$(1 + K_{sa} T_a) / T_{sa}$	$(1 + K_a) / T_{sa}$

\* 【0226】バイアス外乱推定値  $e_D(T_a)$  を用いて、加速モード終了時点  $t = T_a$  における偏差の修正値  $e_{r1}$  を計算する。

【0227】

【数58】 $e_{r1} = \text{err}(T_a) + e_D(T_a)$ 

\* 【0228】ここで、 $\text{err}(T_a)$  は実際の偏差値である。数57の式に加速モード終了時点  $t = T_a$  を代入して得られる解析解  $\text{err}_{rs}$  の値が  $t = T_a$  における偏差の修正値  $e_{r1}$  に等しいとき、それは同定演算部12-6にて用いた追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  が実際値  $T_s$  と同一であることを意味する。即ち、実際の追従安定性指數  $T_s$  が計算されたこととなる。

\* 【0229】図9は追従安定性指數演算部12-6Eの動作の流れを示す流れ図であり、これを参照して説明する。ステップ201にて動作が開始され、ステップ202にて計算に必要な定数  $\alpha_a$ 、 $\beta_a$ 、 $C_{1a}$ 、 $C_{2a}$  及び  $T_s$  が設定される。

\*  $K_{sa}$ 、 $K_{se}$ 、 $K_{se}$  等が設定される。

\* 【0230】ステップ203にて、バイアス外乱推定値  $e_D(T_a)$  によって修正された加速モード終了時点  $t = T_a$  における偏差  $e_{r1}$  が追従安定性指數演算部12-6Eに入力される。ステップ204にて求める追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  の初期値が与えられる。ステップ205にて加速モード終了時点  $t = T_a$  における解析解による偏差  $\text{err}_{rs}(t)$  が上記の方法によって求められる。

\* 【0231】ステップ206にて加速モード終了時点  $t = T_a$  における2つの偏差  $e_{r1}$ 、偏差  $\text{err}_{rs}(t)$  が比較される。両者が等しければ、ステップ208に進み、両者が異なるれば、ステップ207に進む。ステップ207では、追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  が適当な値に更新されステップ205の計算が行われる。こうしてステップ208にて同定された追従安定性指數推定値  $T_{sa}$  が

出力される。ステップ209にて動作が終了する。

【0232】以上本発明の実施例について詳細に説明してきたが、本発明は上述の実施例に限ることなく本発明の要旨を逸脱することなく他の種々の構成が採り得ることは当業者にとって容易に理解されよう。

【0233】

【発明の効果】本発明によると、従来のオートパイロットでは実現することができなかつた操舵機の性能及び船舶の特性を考慮した最適な変針軌道計画が実現可能となる利点がある。

【0234】本発明によると、操舵機の性能を取り込んだ最適な変針軌道計画が得られるので機器の負担を軽減し省燃費を図ることができる利点がある。

【0235】本発明によると変針時の旋回角速度、変針時間等を見積もることができるから、最適な運行計画を達成することができる利点を有する。

【0236】本発明によると、フィードフォワード舵角の最大値及びその角速度の最大値を確定することができるので、操舵機の入力にリミットを設ける必要がなく、連続的な変針特性を保証することができる利点を有する。

【0237】本発明によると、変針時の船舶の運動の初期値を取り込むように構成されているから、変針中に新たな変針設定が可能となる利点を有する。

【0238】本発明によると、自動変針前後のバイアス外乱変化によるパラメータの同定演算の誤差を防止することができるから推定精度を向上させることができる利点を有する。

【0239】本発明は、ソフトウェア的処理によって実現することができるから、マイクロコンピュータを搭載している自動操舵装置に容易に付加することができる利点がある。

【0240】本発明によると、実際の船舶のパラメータが得られるので、そのパラメータと設定されたパラメータとの間のずれによる変針、保針性能の低下を改善することができる利点を有する。

【0241】本発明によると、実際の船舶のパラメータが得られるので、その値を軌道演算部、フィードフォワード制御器及びフィードバック制御器にフィードバックすることによってオートパイロットにおけるシステムが実際の船舶に対応したものとなる利点を有する。

【0242】本発明によると、軌道演算部、フィードフォワード制御器及びフィードバック制御器及び同定演算部の各々は演算過程において独立であるため相互干渉に

よる不確定な状態には陥らず安定な演算が保証される利点を有する。

【0243】本発明によると、制御対象である船舶が不安定船又は安定船のいずれであっても、演算上の問題なく対応することができる利点を有する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明による自動操舵系を示すブロック図である。

10 【図2】本発明によるフィードフォワード制御器の動作を示すブロック図である。

【図3】本発明によるフィードバック制御器の動作を示すブロック図である。

【図4】本発明による軌道演算部の構成例を示す図である。

【図5】本発明による軌道計画部の動作を示す流れ図である。

【図6】本発明による参考針路とフィードフォワード舵角の例を示す図である。

20 【図7】本発明による同定演算部の構成例を示す図である。

【図8】本発明による同定演算部の動作シーケンスを示す図である。

【図9】本発明による追従安定性指標演算部の動作を示す流れ図である。

【図10】従来の船舶用自動操舵系の構成例を示す図である。

【図11】従来の自動操舵装置（オートパイロット）の構成を示す図である。

30 【図12】従来の船舶用自動操舵系の変針応答特性を示す図である。

【符号の説明】

11 加算器

12 自動操舵装置（オートパイロット）

12-1 軌道演算部

12-2 フィードフォワード制御器

12-3 フィードバック制御器

12-4、12-5 加算器

12-6 同定演算部

13 加算器

14 制御対象

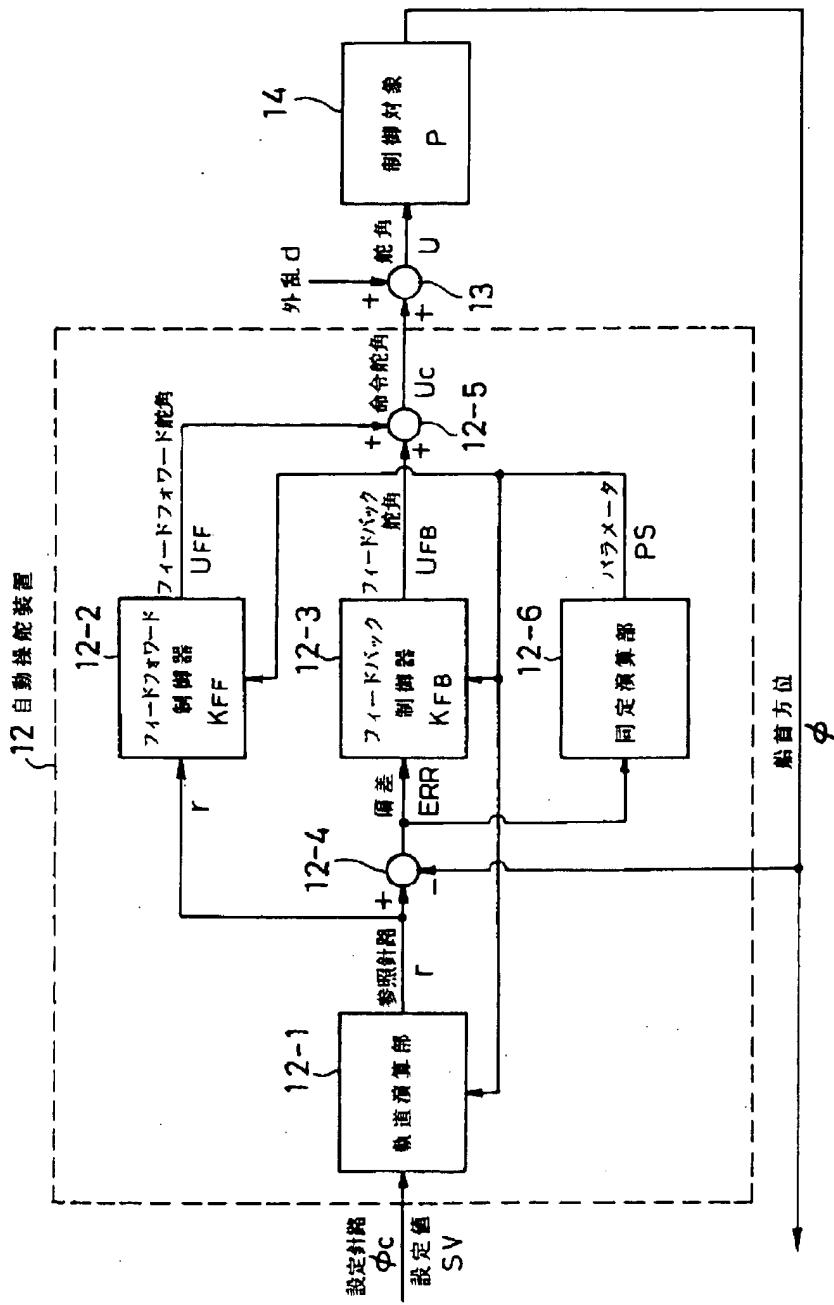
14-1 船体

14-2 船首方位検出器

16 操舵機

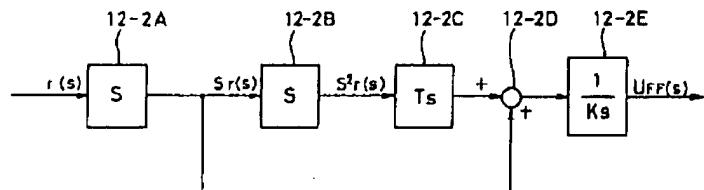
120 自動操舵装置（オートパイロット）

【図1】



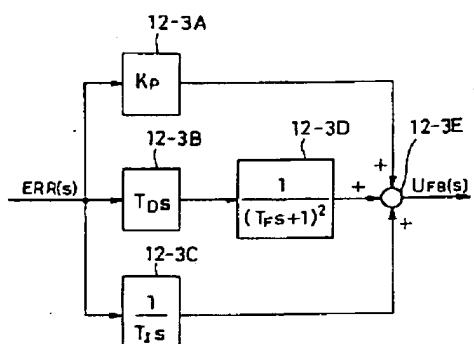
本発明による船舶用自動操舵系の構成例

【図2】



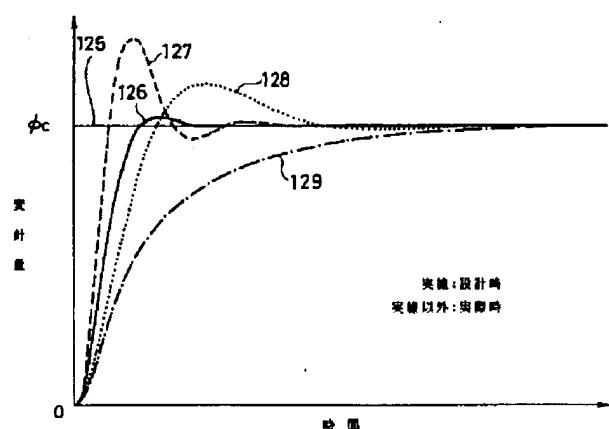
フィードフォワード制御器の動作

【図3】



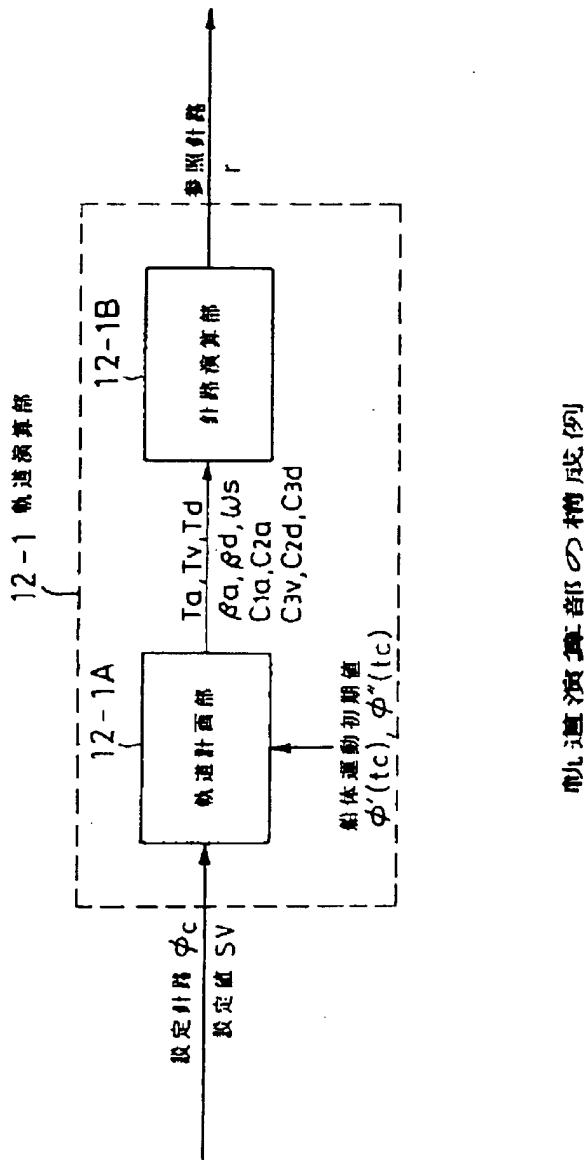
フィードバック制御器の動作

【図12】



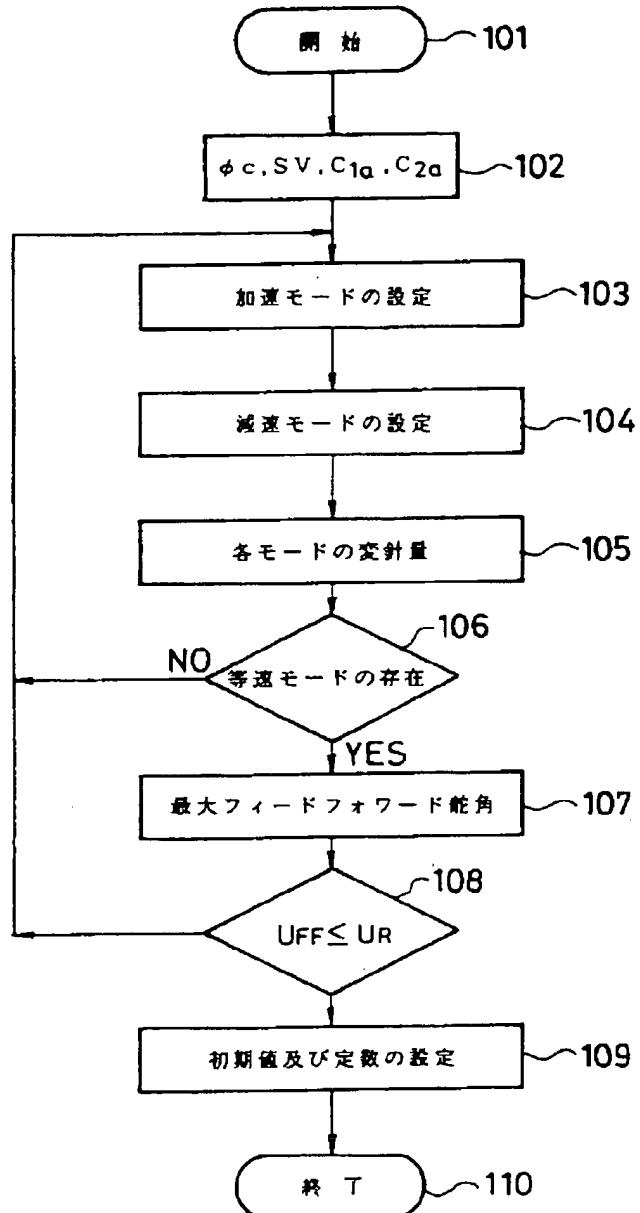
従来の自動操舵装置の変針度特性

【図4】



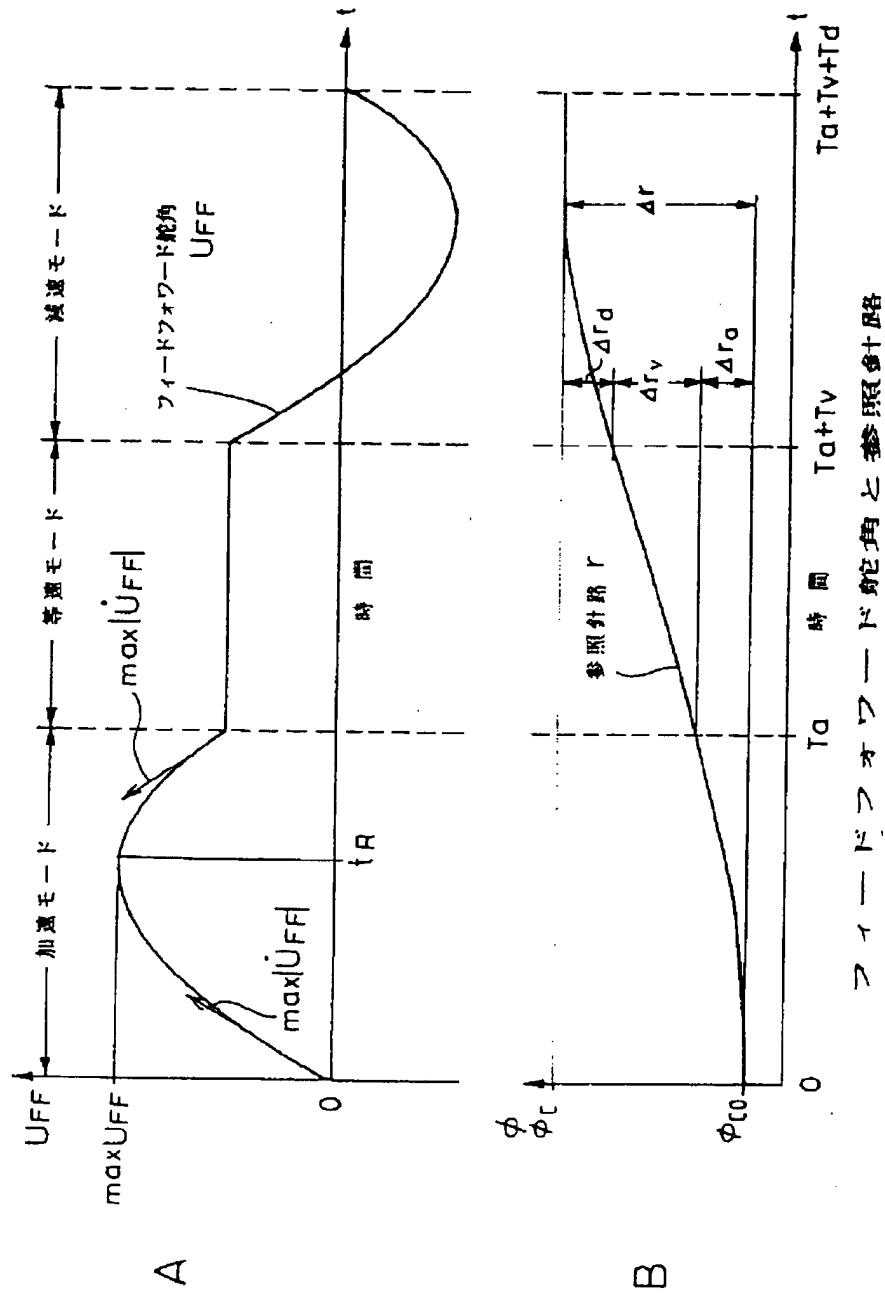
軌道演算部の構成例

【図5】

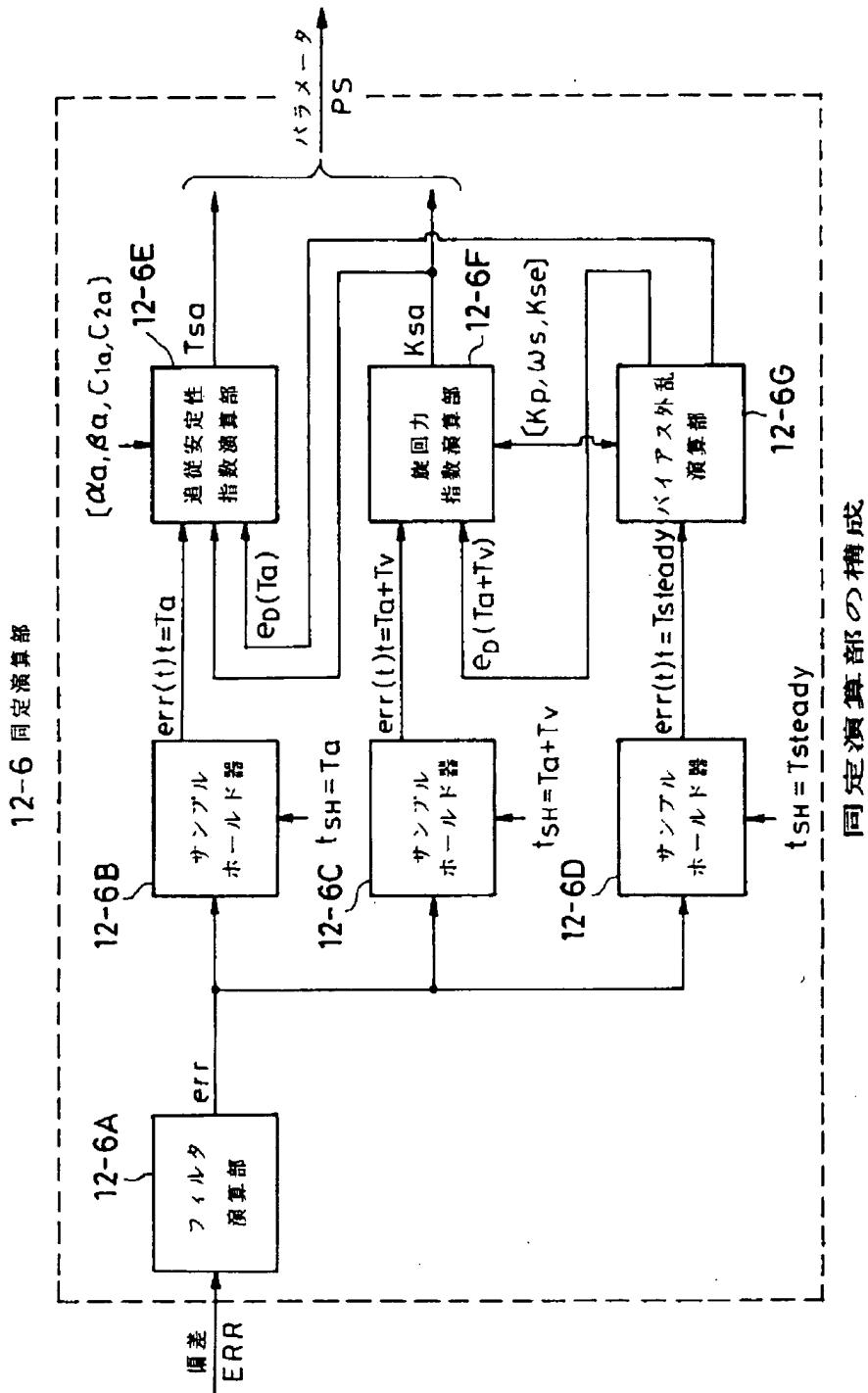


軌道計画部の流れ

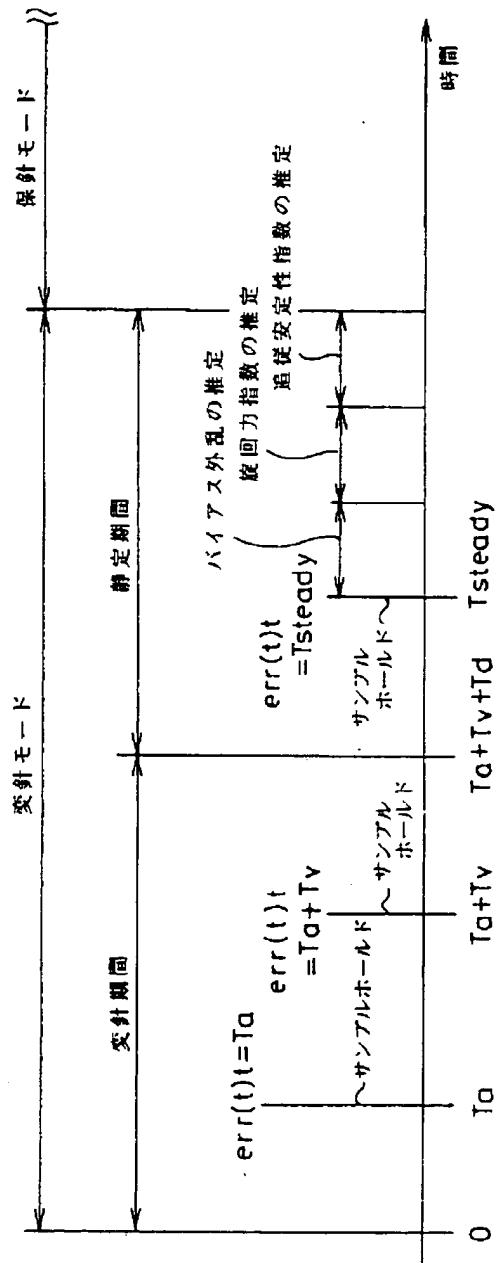
【図6】



【図7】

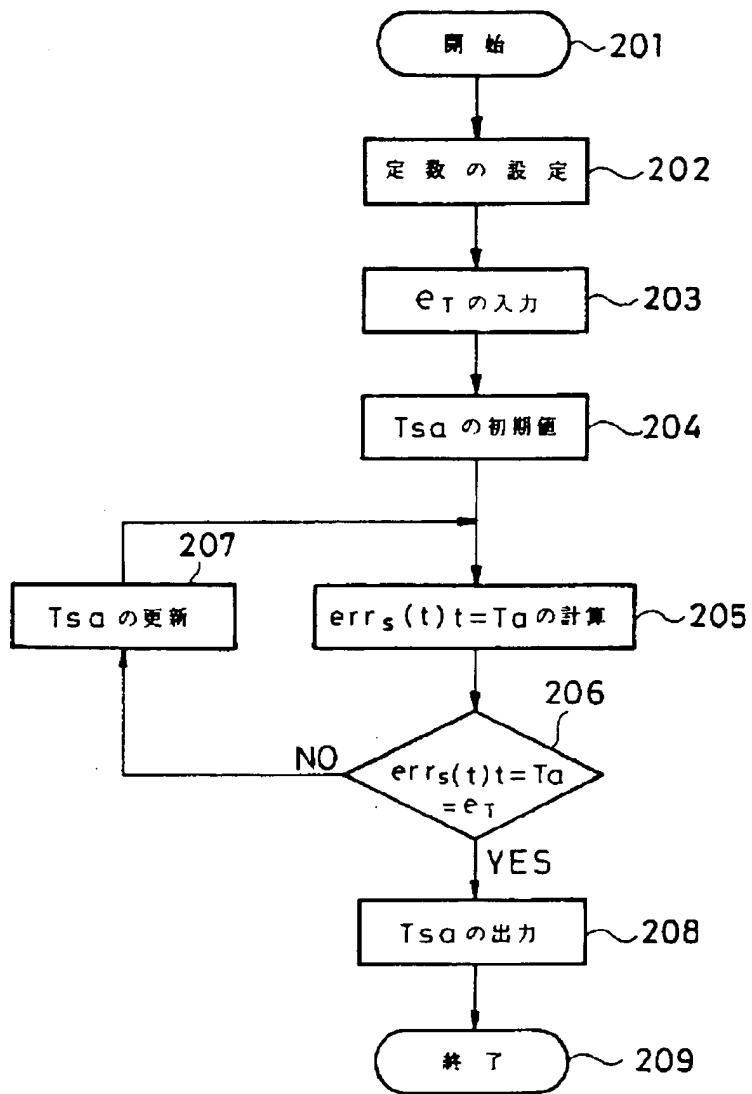


[图8]



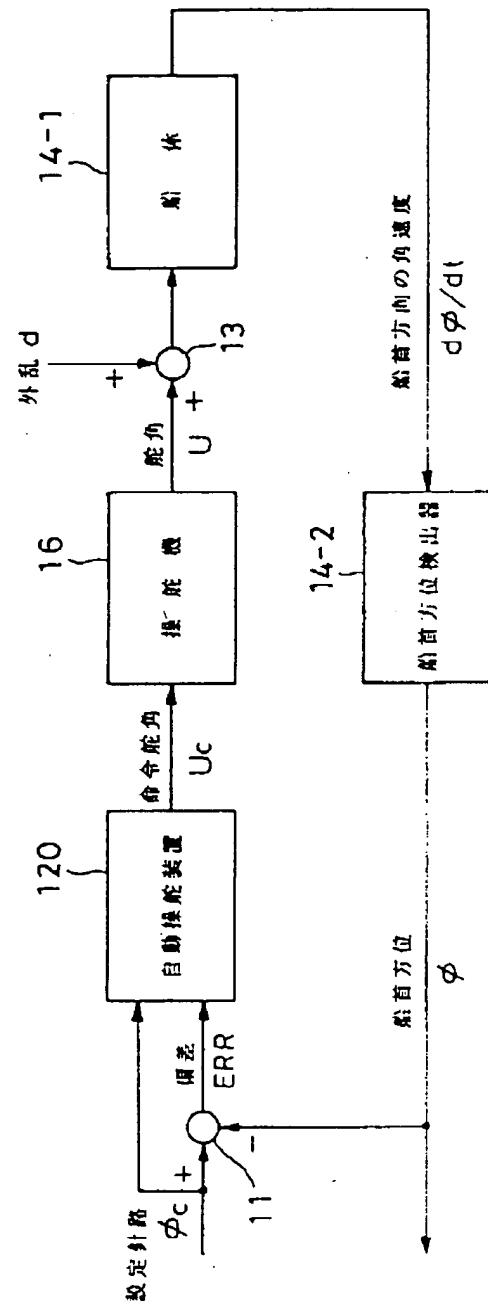
## 同定演算部の動作シーケンス

【図9】



追従安定性指數演算部の動作の流れ

【図10】



従来の船舶用自動操舵系統の構成

### 【図11】

